ILIE CRĂCIUN
ZOLTAN HASCI
CONSTANTIN STAN

X

OPERAȚII ȘI UTILAJE ÎN INDUSTRIA CHIMICĂ

Manual pentru licee de chimie industrială clasa a X-a

EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ,
BUCUREȘTI-1980

ing. ILIE CRĂCIUN
profesor

ing. ZOLTAN HASCI
profesor

ing. CONSTANTIN STAN
profesor

OPERAȚII ȘI UTILAJE ÎN INDUSTRIA CHIMICĂ

Manual pentru licee de chimie industrială (meseria operator în industria chimică), clasa a X-a

EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ, BUCUREȘTI

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL I

OPERAȚII HIDRODINAMICE

A. TRANSPORTUL FLUIDELOR

Pompele sînt dispozitive hidraulice prin intermediul cărora se furnizează fluidelor energia necesară transportului, se asigură presiunea cerută de proces, se mărește viteza de circulație, se ridică fluidul la o anumită înălțime geometrică.

După natura fluidului pompat, pompele se împart în pompe pentru lichide și pompe pentru gaze (compresoare).

1. POMPE PENTRU LICHIDE

În instalațiile industriale, transportul lichidelor se face prin curgere liberă (de la un nivel superior la un nivel inferior) și cu ajutorul pompelor (pe orizontală sau de la un nivel inferior la un nivel superior).

După criteriul constructiv și principiul de funcționare, pompele se clasifică în pompe fără elemente mobile, pompe cu mișcări alternative, pompe rotative și pompe centrifuge.

a. **Parametrii caracteristici ai pompelor**

Debitul masic Q_m reprezintă masa fluid transportată de pompă în unitatea de timp (kg/s).

Debitul volumetric Q_v reprezintă volumul de fluid transportat de pompă în unitatea de timp (m^3/s).

Presiunea de aspirație p_a este presiunea cu care intră fluidul în pompă. În cazul lichidelor, presiunea de aspirație trebuie să fie mai mare decît presiunea de vapori a lichidului la temperatura la care are loc aspirația.

Înălțimea maximă de aspirație $H_{a\,max}$ reprezintă distanța maximă pe verticală (între suprafața lichidului ce trebuie pompat și

Scanned with OKEN Scanner

axul pompei), la care poate fi montată o pompă, pentru a se asigura aspirația lichidului.

Înălțimea de aspirație depinde de presiunea exercitată asupra lichidului pompat, de temperatura și densitatea acestuia, de rezistențele opuse curgerii în conducta de aspirație, de etanșeitatea conductelor de aspirație și a pompei etc.

Înălțimea H_a la care este montată pompa trebuie să fie mai mică decît înălțimea maximă de aspirație ($H_a < H_{a\,max}$). În practică, pentru lichide cu temperaturi de 15—20°C, înălțimea H_a este mai mică de 6 metri.

Presiunea de refulare p_r reprezintă presiunea fluidului la ieșirea din pompă. Aceasta trebuie să asigure circulația fluidului în conducta de refulare, astfel încît fluidul să atingă înălțimea maximă de refulare.

Înălțimea maximă de refulare H_{max} reprezintă distanța maximă pe verticală între nivelul la care poate fi ridicat un lichid și nivelul la care se află axul pompei. Înălțimea de refulare H_r a pompei trebuie să fie mai mică ca înălțimea maximă de refulare ($H_r < H_{r\,max}$).

Înălțimea geometrică totală de pompare H_g este dată de diferența între nivelul la care trebuie ridicat lichidul și nivelul suprafeței lichidului de transportat sau de suma între înălțimea de aspirație și înălțimea de refulare.

Înălțimea manometrică totală H_m reprezintă, în metri coloană de fluid, energia transferată de pompă unității de masă a fluidului, adică diferența dintre energiile pe care le conține fluidul la refulare și la aspirație.

Această energie trebuie să asigure mărirea vitezei fluidului, mărirea presiunii statice a fluidului, ridicarea fluidului la un anumit nivel, învingerea rezistențelor din traseul prin care curge fluidul.

Puterea pompelor. Puterea este energia consumată în unitatea de timp.

Puterea utilă N_u a unei pompe care transportă debitul volumetric Q_v și realizează înălțimea manometrică H_m se calculează cu relația:

$$N_u = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_m = Q_m \cdot g \cdot H_m. \qquad \text{(I-1)}$$

Puterea consumată sau puterea de antrenare a pompelor N este mai mare decît puterea utilă. Ea se calculează cu relația:

$$N = \frac{N_u}{\eta_t} = \frac{Q_v \cdot \rho \cdot g H_m}{1000\,\eta_t}; \qquad \text{(I-2)}$$

unde η_t este randamentul total al pompei ($\eta_t < 1$).

Scanned with OKEN Scanner

Randamentul total al pompei este dat de produsul:

$$\eta_t = \eta_m \cdot \eta_h \cdot \eta_v \qquad \text{(I-3)}$$

unde: η_m este r a n d a m e n t u l m e c a n i c al pompei, care ține seama de pierderile de energie datorită frecării pieselor în mișcare (arbore și lagăre, piston și cilindru, rotor și carcasă etc.);

η_h — r a n d a m e n t u l h i d r a u l i c al pompei, care ține seama de pierderile de energie datorită rezistențelor hidraulice și inerției, care apar la curgerea fluidului prin pompă;

η_v — r a n d a m e n t u l v o l u m i c al pompei, care ține seama de pierderile de energie datorită pierderilor de debit în pompă (debitul volumetric real al unei pompe este mai mic decît debitul volumetric teoretic al pompei).

b. Pompe fără elemente mobile

Pompele fără elemente mobile se folosesc pentru transvazarea lichidelor și mai puțin pentru transportul acestora. Ele folosesc energia potențială de poziție a lichidului de transportat (sifonul), sau energia unui fluid motor (montejusul, gaz-liftul, injectorul).

Sifonul (fig. I.1) este format dintr-o țeavă *1* îndoită în formă de U. Pentru a se asigura transvazarea lichidului din vasul *2* în vasul *3* trebuie ca sifonul să fie amorsat, adică în ramura descendentă să aibă lichid pe o înălțime $h = h_2 - h_1$, mai mare decît suma pierderilor de energie (în metrii coloană de lichid), iar în punctul cel mai ridicat al sifonului, presiunea să fie mai mare ca presiunea de vapori a lichidului la temperatura de lucru.

Montejusul (fig. I.2) servește pentru ridicarea lichidelor, în special a celor corosive, cu ajutorul aerului sau a altui gaz comprimat.

Montejusul se poate construi din materiale anticorosive, putînd transporta și lichide care conțin suspensii solide.

Pe lîngă funcționare intermitentă, montejusul are și dezavantajul unui randament mic (15—20%).

Pompa gaz-lift Mammut (fig. I.3). Se folosește la ridicarea lichidelor curate sau conținînd suspensii solide, cu ajutorul aerului comprimat. Funcționarea lor se bazează pe

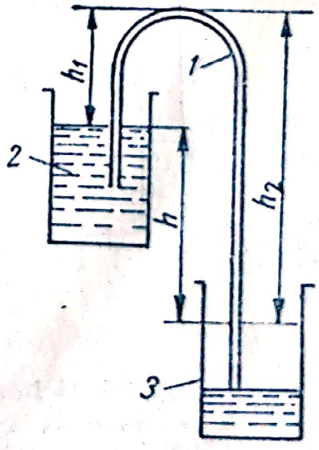

Fig. I.1. Schema sifonului.

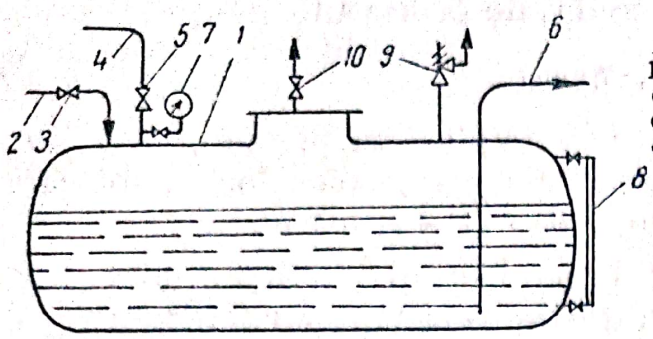

Fig. I.2. Schema montejusului:
1 — recipient; *2* — conductă de umplere cu lichid; *3* — robinet de sens unic; *4* — conductă de gaz comprimat; *5* — robinet; *6* — conductă de refulare; *7* — manometru; *8* — indicator de nivel; *9* — supapă de siguranță; *10* — robinet de aerisire.

principiul vaselor comunicante umplute cu lichide nemiscibile de densități diferite.

Amestecul eterogen lichid-gaz din țeava *2* avînd o densitate mai mică este ridicat de coloana de lichid de densitate mai mare din exteriorul țevii *2*. La ridicarea lichidului contribuie și energia cedată acestuia de aerul comprimat.

În duza *1*, viteza fluidului motor crește și energia de presiune se transformă în energie cinetică. Fluidul motor intră cu viteză mare în ajutajul de amestec *2* creînd în camera *3* o depresiune, care asi-

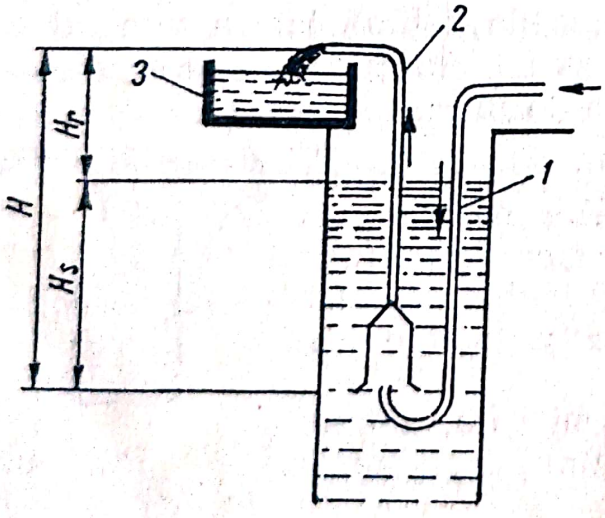

Fig. I.3. Schema pompei gaz-lift:
1 — conductă de aer comprimat; *2* — conductă de refulare; *3* — vas separator.

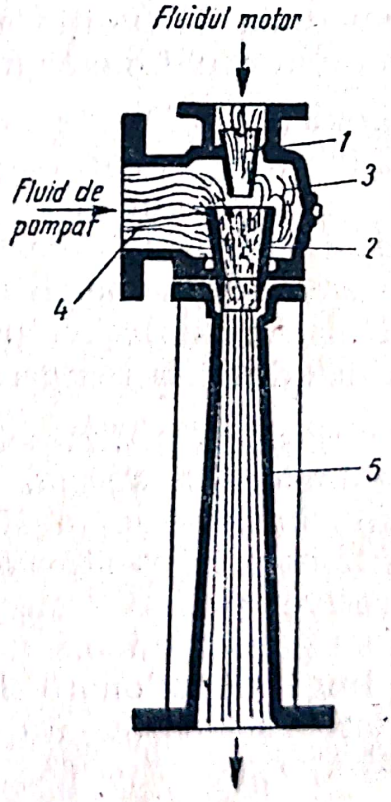

Fig. I.4. Schema injectorului (ejectorului):
1 — duză; *2* — ajutaj de amestec; *3* — cameră de aspirație; *4* — conductă de aspirație; *5* — difuzor.

Scanned with OKEN Scanner

gură aspirarea lichidului de pompat. În difuzorul 5 viteza amestecului scade (energia cinetică se transformă în energie de presiune).

Pompele Mammut au dezavantajul unui randament scăzut, necesitînd adîncimi mari de scufundare.

Injectoarele și ejectoarele (fig. I.4) sînt dispozitive care folosesc energia cinetică a unui fluid motor: abur, apă sub presiune, aer comprimat.

Injectoarele refulează lichid într-un spațiu aflat sub presiune, iar ejectoarele aspiră lichid dintr-un spațiu în care creează vid.

Injectoarele sînt aparate de construcție simplă, cu funcționare sigură, fără zgomot și fără supraveghere, pot transporta lichide impure sau murdare (noroaie), pot fi construite din materiale anticorosive.

Dezavantajele injectoarelor sînt: randament mic (10—30%), consum mare de fluid motor, diluarea lichidului de pompat cu fluidul motor.

c. Pompe cu mișcări alternative

Principiul de funcționare al acestor pompe este următorul: în interiorul camerei de pompare (corpul pompei, cilindrul) un piston disc, plonjor, sau o membrană elastică (elementul mobil) execută o mișcare alternativă realizînd o variație a volumului camerei de pompare. Ciclul de pompare este format din *faza de aspirație* (la mărirea volumului cilindrului, supapa de refulare este închisă, iar depresiunea creată determină deschiderea supapei de aspirație și aspirarea lichidului în cilindru) și *faza de refulare* (la micșorarea volumului camerei de pompare, supapa de aspirație se închide, presiunea crește determinînd deschiderea supapei de refulare și evacuarea lichidului din cilindru).

Mișcarea alternativă, de translație a elementului mobil se realizează cu ajutorul mecanismului bielă-manivelă, care transformă mișcarea de rotație a unui arbore cotit în mișcare de translație alternativă a elementului mobil în interiorul corpului pompei.

Pompa cu piston disc (fig. I.5). La deplasarea pistonului din poziția *A* în poziția *B* (cursa pistonului) are loc aspirația lichidului în cilindru. La cursa inversă, de la *B* la *A*, lichidul este refulat din cilindru. Refularea lichidului se face *intermitent* (din două în două curse ale pistonului). Acest tip de pompă la care numai o față a pistonului este activă (vine în contact cu lichidul de pompat) se numește *pompă cu simplu efect*.

Scanned with OKEN Scanner

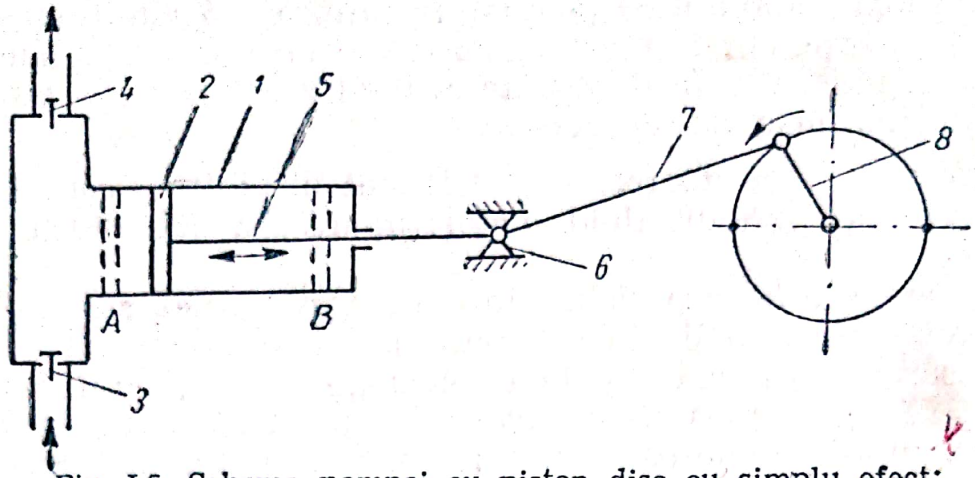

Fig. I.5. Schema pompei cu piston disc cu simplu efect:
1 — cilindru; *2* — piston disc; *3* — supapă de aspirație; *4* — supapă de refulare; *5* — tija pistonului; *6* — capul de cruce; *7* — biela; *8* — arbore cotit (manivelă).

Cînd ambele fețe ale pistonului sînt active, pompa se numește cu *dublu efect* (fig. I.6.). Aceste pompe au supape de aspirație și refulare la ambele capete ale cilindrului și refulează lichid la fiecare cursă a pistonului; în timp ce într-o parte a acestuia are loc aspirația, în cealaltă parte are loc refularea și invers.

În funcție de numărul de cilindrii montați paralel pe același arbore, pompele cu simplu sau dublu efect pot fi *simplex* (cu un singur cilindru), *duplex* (cu doi cilindri decalați la 180°), *triplex* (cu trei cilindri decalați la 120°) etc.

După pozițiile cilindrilor, pompele pot fi orizontale și verticale.

Pompa cu piston plonjor (fig. I.7.) Pistonul plonjor (plungerul) *2* este un corp cilindric de volum relativ mare. Între plunger și ci-

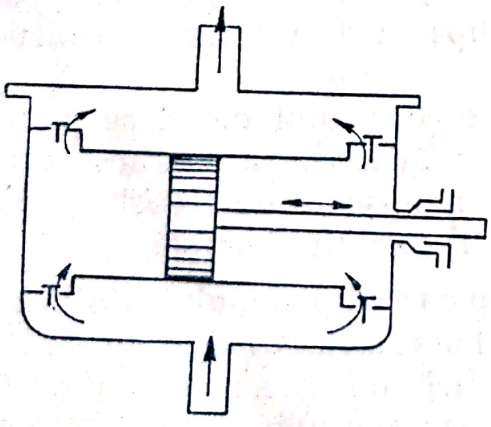

Fig. I.6. Schema pompei cu piston disc cu dublu efect.

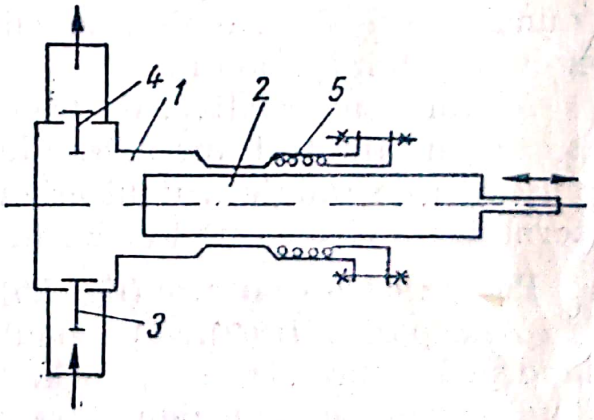

Fig. I.7. Schema pompei cu piston plonjor:
1 — camera de pompare; *2* — plungerul; *3* — supapa de aspirație; *4* — supapa de refulare; *5* — cutia de etanșare.

Scanned with OKEN Scanner

lindru nu se realizează o etanșare (plungerul nu freacă pe pereții cilindrului). Etanșarea se realizează cu ajutorul unei cutii de etanșare 5, montată în capacul camerei de pompare, direct pe plunger. Această soluție constructivă permite folosirea lor la transportul lichidelor care conțin solide în suspensie.

Pompa cu piston lichid (fig. I.8) se folosește pentru transportul lichidelor corosive și calde. Pistonul sau plungerul și cilindrul sînt protejate printr-o pernă de lichid — necorosiv și nemiscibil cu lichidul de pompat.

Pompa cu membrană (fig. I.9) se folosește pentru transportul lichidelor corosive. Între lichidul de pompat și lichidul de protecție este montată o membrană elastică 4. Variația camerei de pompare se face prin deformarea membranei într-un sens sau altul. Membrana se realizează dintr-un material elastic rezistent la acțiunea chimică a lichidului de pompat.

Pompa de mînă se folosește pentru debite mici de lichid, la manipulări de scurtă durată și pentru înălțimi de refulare mici (max. 5 m).

Pompele cu mișcări alternative se folosesc cînd trebuie transportate debite de lichide relativ mici la presiuni ridicate. Ele funcționează cu un randament mare (0,7—0,9). Un dezavantaj al acestor pompe este neuniformitatea și reglarea dificilă a debitului.

Pentru uniformizarea debitului pompelor cu mișcări alternative, pe lîngă soluția folosirii mai multor cilindri se utilizează camerele

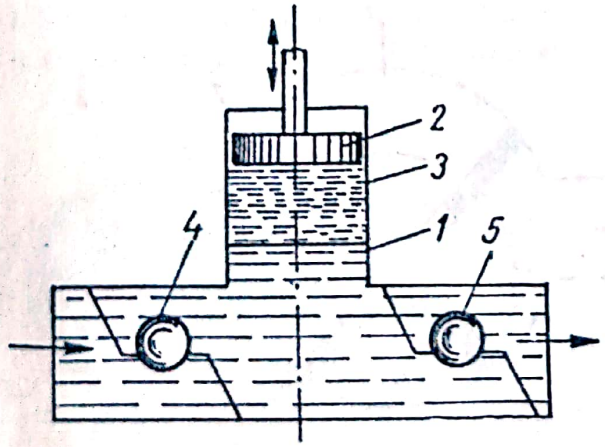

Fig. I.8. Schema pompei cu piston lichid:

1 — cilindru; *2* — piston; *3* — piston lichid; *4* — supapă de aspirație; *5* — supapă de refulare.

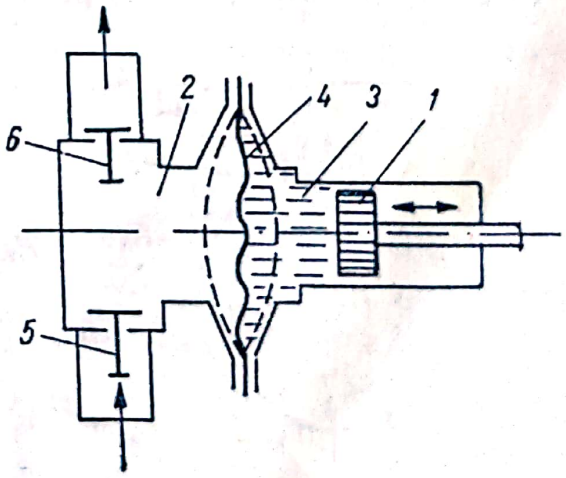

Fig. I.9. Schema pompei cu membrană:

1 — piston; *2* — cameră de pompare; *3* — lichid de protecție; *4* — membrană elastică; *5* — supapă de aspirație; *6* — supapă de refulare.

Scanned with OKEN Scanner

pneumatice, care se montează pe conducta de refulare şi preiau, prin comprimarea gazului din cameră, pulsaţiile de debit şi variaţiile de presiune.

Reglarea debitului pompelor cu mişcări alternative se face prin modificarea numărului de curse ale elementului mobil, prin modificarea lungimii cursei elementului mobil, precum şi prin recircularea parţială a lichidului din conducta de refulare în conducta de aspiraţie, folosind o conductă de legătură (de ocolire sau by-pass).

Cînd sînt necesare debite mari de lichid se leagă două sau mai multe pompe în paralel, iar cînd sînt necesare presiuni ridicate se leagă în serie. La legarea în serie între pompe se montează rezervoare intermediare sau tampon.

d. Pompe rotative

Pompele rotative realizează transportul lichidelor cu ajutorul unor piese (dispozitive) care se rotesc etanş între ele, sau cu pereţii interiori ai unei carcase de formă corespunzătoare. Piesele rotative au forme diferite (tambure, roţi dinţate, şuruburi etc.) şi se montează concentric sau excentric în interiorul carcasei pompei.

Pompa cu tambur excentric (fig. I.10) este formată dintr-o carcasă cilindrică în care se roteşte un tambur montat excentric. Lichidul intră în spaţiul dintre tambur şi carcasă (aspiraţie) şi este împins de tamburul excentric spre ieşirea din pompă (refulare). Spaţiile de aspiraţie şi de refulare sînt despărţite printr-o lamă *3* care se sprijină continuu şi etanş pe tambur.

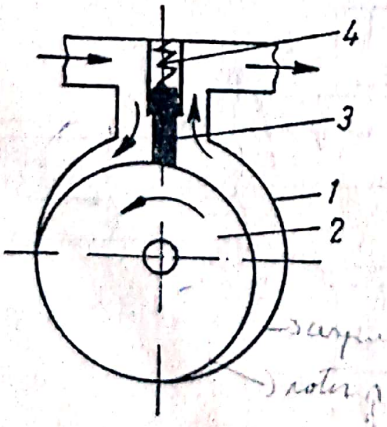

Fig. I.10. Schema pompei cu tambur excentric:
1 — carcasă cilindrică; *2* — tambur excentric; *3* — lamă; *4* — arc.

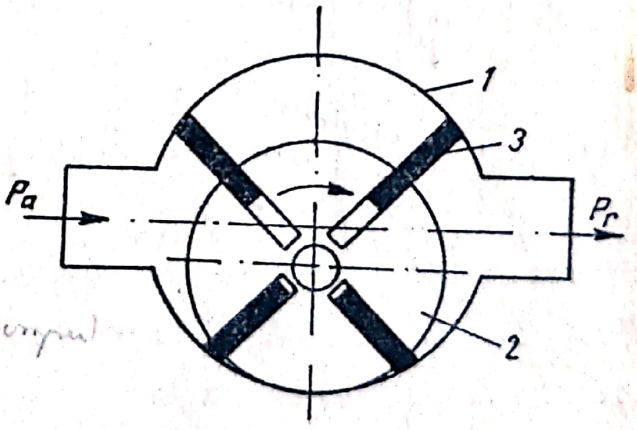

Fig. I.11. Schema pompei cu palete culisante:
1 — carcasa pompei; *2* — rotor excentric; *3* — palete culisante.

Scanned with OKEN Scanner

Aceste pompe se folosesc pentru pomparea lichidelor calde vîscoase, sau ca pompe de ungere.

Pompa cu palete culisante (fig. I.11). Rotorul *2* montat excentric în interiorul unei carcase *1* este prevăzut cu canale în care culisează paletele *3*. În timpul rotirii, datorită forței centrifuge, paletele se sprijină pe suprafața interioară a carcasei, delimitînd spații ale căror volum variază în timpul rotirii, funcție de poziția ocupată în carcasă. În zona de aspirație, depresiunea creată, datorită creșterii volumului spațiilor, determină aspirația lichidului, iar în zona de refulare, scăderea volumului spațiilor determină refularea lichidului. Realizează debite pînă la 360 l/min.

Pompa cu roți dințate (fig. I.12) este formată din două roți dințate *2*, egale ca mărime și care se rotesc în sensuri opuse. Una dintre roți este antrenată de un motor. Dinții roților se îmbină etanș între ei și față de carcasă, delimitînd spații de volum egal în care este transportat lichidul.

Este o pompă robustă și relativ simplă. Realizează debite între 4 și 600 l/min.

Pompa cu șurub (fig. I.13). În corpul pompei sînt montate două șuruburi de construcție specială. Spirele șuruburilor sînt orientate în sensuri opuse și se întrepătrund etanș. Față de pereții interiori ai carcasei pompei, spirele sînt etanșe, delimitînd spațiile prin care este transportat lichidul. Unul dintre șuruburi este pus în mișcare de rotație cu ajutorul unui motor (șurub motor) și determină mișcarea de rotație în sens opus, a celuilalt șurub (șurub condus).

Debitul pompelor rotative este uniform și independent de presiunea de refulare, fiind determinat de caracteristicile geometrice ale pompei și de turația dispozitivelor rotative.

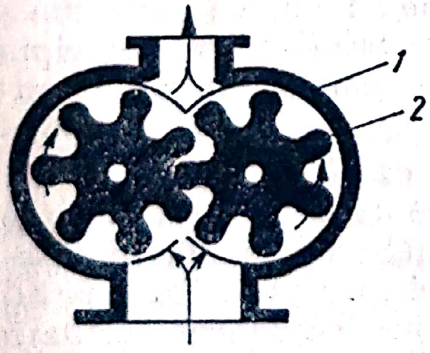

Fig. I.12. Schema pompei cu roți dințate:
1 — carcasa pompei; *2* — roți dințate.

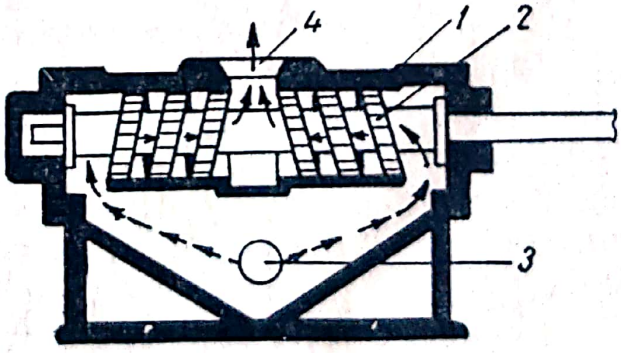

Fig. I.13. Schema pompei cu șurub:
1 — corpul pompei; *2* — șurub; *3* — conductă de aspirație; *4* — conductă de refulare.

Scanned with OKEN Scanner

Pompele rotative sînt autoamorsabile cu un randament bun (pînă la 80%), se pot construi din materiale anticorosive, pot pompa lichide vîscoase, fierbinți cu un conținut ridicat de gaze, ungerea lor se face chiar de către lichidul transportat.

Dezavantajele pompelor rotative sînt: dispozitivele rotative se uzează datorită frecării, produc zgomot în funcționare, se folosesc pentru lichide lipsite de suspensii.

e. Pompe centrifuge

Schematic, o pompă centrifugă este reprezentată în figura I.14.

Rotorul *2* al pompei este format dintr-o serie de palete curbate în sens invers sensului de rotație al rotorului.

Rotoarele pot fi radiale și axiale.

Rotoarele radiale sînt de tip *închis* (paletele sînt fixate între două discuri laterale), *semiînchis* (paletele sînt fixate pe un singur disc lateral) și *deschis* (fără discuri laterale).

În *rotorul radial,* particulele de lichid sînt antrenate în mișcare de rotație și împinse de la centru spre periferie de cîmpul de forțe centrifuge care apare la rotirea cu turație mare a rotorului. Acesta creează în centrul rotorului o depresiune, datorită căreia lichidul este aspirat axial și continuu în pompă prin orificiul din jurul arborelui *3*, iar la periferie o presiune, datorită căreia lichidul este evacuat continuu din pompă prin conducta de refulare.

La ieșirea din canelele radiale, lichidul are o viteză mare, căreia îi corespunde o energie cinetică mare. În spațiul de formă melcată al carcasei în care este colectat lichidul, viteza lui se micșorează mult (energia cinetică a lichidului se transformă în energie de presiune). Pompele care funcționează pe baza acestui principiu se numesc *pompe centrifuge radiale.*

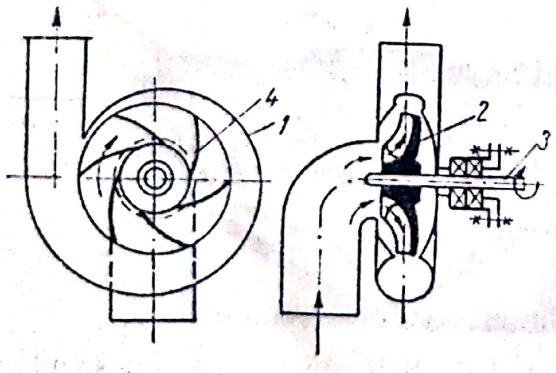

Fig. I.14. Schema pompei centrifuge: *1* — corpul pompei; *2* — rotor; *3* — arbore; *4* — palete.

Rotorul axial este format din 4—6 palete răsucite în formă de elice, montate pe un ax în interiorul unei carcase. Transportul lichidului are loc datorită acțiunii cîmpului de forțe centrifuge (determinat de învîrtirea rotorului), mișcării turbionare (creată de profilul paletelor) și împingerii lichi-

Scanned with OKEN Scanner

dului de către palete. Aceste pompe se numesc *pompe centrifuge axiale*. Ele au diametru mic și realizează un debit mare (pînă la 8 m^3/s) și înălțimi de aspirație mici.

Pentru a funcționa normal, pompele centrifuge trebuie să fie tot timpul *pline cu lichid* (să fie amorsate). Amorsarea pompelor se face înainte de pornire. Modalitățile de amorsare depind de poziția pompei față de nivelul lichidului din vasul din care se aspiră.

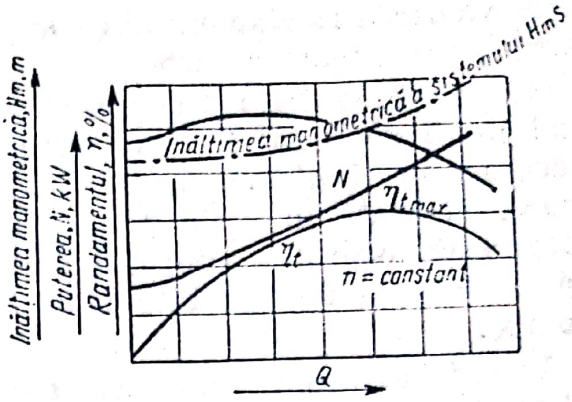

Fig. I.15. Diagrama caracteristicilor de funcționare a pompelor centrifuge.

Dacă pompa este sub nivelul lichidului, amorsarea se face deschizînd robinetul de pe conducta de aspirație și de pe conducta de aerisire a pompei, care este amplasat deasupra nivelului pompei (toate celelalte robinete sînt închise). Cînd prin acesta curge lichid, pompa s-a amorsat (robinetul se închide, urmînd pornirea pompei).

Dacă pompa este deasupra nivelului lichidului, amorsarea se face introducînd lichid prin conducta de aerisire a pompei, pînă la umplerea conductei de aspirație (sorbul) și a pompei.

Pompele centrifuge submersibile (care se introduc în lichidul de pompat) se amorsează odată cu introducerea lor în lichid.

Pentru exploatarea corectă a pompelor centrifuge este foarte important să se cunoască relația între debit, înălțimea manometrică, putere și randament, la turație constantă. Această relație se stabilește la bancul de probă făcînd mai multe determinări. Cu rezultatele obținute se construiește o diagramă (fig. 1.15) numită *diagrama caracteristicilor de funcționare a pompelor centrifuge*.

Din analiza diagramei rezultă că pompa nu funcționează decît în domeniul de debite pentru care $H_m \geqslant H_{ms}$ (H_{ms} este înălțimea manometrică a sistemului și depinde de caracteristicile sistemului deservit de pompă). Debitul maxim la care pompa funcționează normal corespunde punctului de intersecție dintre înălțimea manometrică a pompei și înălțimea manometrică a sistemului; acest punct se numește *punct de lucru*.

Dacă debitul pompei este constant, se recomandă ca pompa să funcționeze cu debitul care corespunde randamentului maxim; dacă este variabil se recomandă ca pompa să funcționeze cu debite la

Scanned with OKEN Scanner

care valoarea randamentului este apropiată de valoarea maximă (pe partea crescătoare a curbei).

O pompă centrifugă cu un singur rotor nu poate crea o presiune mai mare de $2 \cdot 10^5$ Pa (o înălțime de circa 20 m apă). Cînd sînt necesare presiuni mai mari se construiesc pompe cu mai multe rotoare, montate în serie pe același ax, astfel încît refularea unui rotor este aspirația rotorului următor (multietajate-fig. 1.16). Pentru realizarea unor debite mari se pot lega în paralel mai multe pompe.

Pentru evitarea deplasării axiale a sistemului arbore-rotor se folosesc discurile de echilibrare sau rotoarele cu aspirație bilaterală (fig. 1.17).

Pompele centrifuge sînt pompele cu cea mai largă utilizare în industria chimică datorită simplității lor constructive, flexibilității în folosire, întreținerii ușoare și a costului redus. Se folosesc cînd trebuie asigurate debite mari (pînă la 40 m^3/s). Presiunea de refulare pe care o realizează este în funcție de numărul de etaje. Ele au un debit uniform, gabarit mic, nu au supape, permit cuplarea directă a motorului de antrenare.

Pompele centrifuge nu pot realiza presiuni mari, au un randament mai mic (0,6—0,85), se pretează greu la pomparea lichidelor vîscoase și nu sînt autoamorsabile.

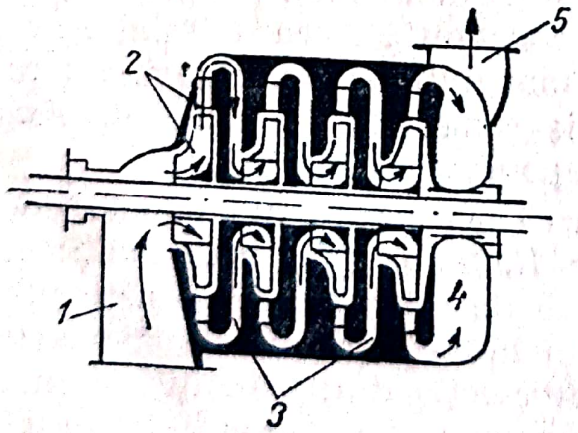

Fig. I.16. Schema pompei centrifuge multietajate:
1 — aspirație; *2* — rotoare; *3* — canale de conducere a lichidului; *4* — colectorul ultimei trepte; *5* — refulare:

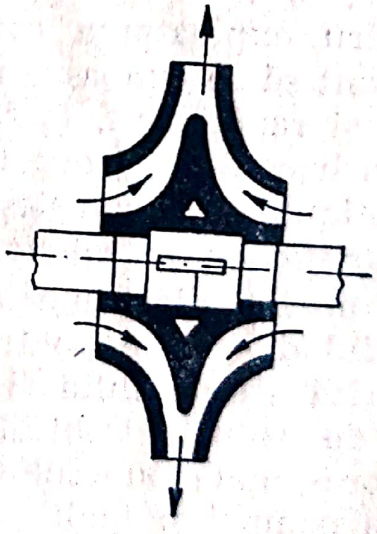

Fig. I.17. Rotor cu aspirație bilaterală.

Scanned with OKEN Scanner

Aplicații

1. O pompă asigură transportul a 10 m^3/min. de lichid cu densitatea de 1 200 kg/m^3. Presiunea la aspirație este de $2 \cdot 10^5$ Pa, iar la refulare de $6 \cdot 10^5$ Pa. Să se calculeze înălțimea manometrică realizată de pompă și puterea utilă a pompei.

R: 33,9 m; 66,6 kW.

2: O pompă transportă într-o oră 500 m^3 lichid cu densitatea de 900 kg/m^3. Să se calculeze puterea de antrenare a pompei știind că înălțimea manometrică a pompei este de $50 \cdot 10^5$ Pa, randamentul mecanic de 0,87, randamentul hidraulic de 0,82 și randamentul volumic de 0,92.

R: 1058,5 kW.

2. POMPE PENTRU GAZE

Pompele pentru gaze, denumite și compresoare, au la bază aceleași principii de funcționare ca și pompele pentru lichide. Deosebirile rezultă din proprietățile gazelor de a fi compresibile. Variația de volum este însoțită de variația temperaturii și a presiunii gazului.

Comprimarea gazelor poate fi *izotermă* (la temperatură constantă), *adiabată* (fără schimb de căldură cu mediul exterior) și *politropă* (cînd se schimbă căldură cu mediul exterior, iar temperatura gazului variază în timpul comprimării). Procesul real, practic, prin care se realizează comprimarea gazului este cel politrop.

În urma comprimării, presiunea gazului crește. Raportul între presiunea de refulare p_r și presiunea de aspirație p_a se numește raport (grad) de comprimare.

$$r = \frac{p_r}{p_a}$$

După valoarea raportului de comprimare, pompele pentru gaze se împart în compresoare ($r > 3$), în ventilatoare și suflante ($1 < r < 3$) și în pompe de vid.

După principiul de funcționare, pompele pentru gaze se clasifică în pompe fără elemente mobile, cu piston, rotative și centrifuge.

Scanned with OKEN Scanner

a. Pompe cu piston pentru gaze

Principiul de funcţionare al pompelor cu piston pentru gaze este asemănător cu cel al pompelor cu piston pentru lichide. Avînd raporte de comprimare mai mari decît trei, uzual, se numesc compresoare cu piston.

Diagrama compresorului teoretic (fig. I.18). Compresorul teoretic se caracterizează prin faptul că refulează întreaga cantitate de gaz aflată în cilindru, că supapele nu determină apariţia unor rezistenţe hidraulice la trecerea gazelor prin ele şi că se deschid şi se închid fără întîrziere (nu au inerţie) la aspiraţie şi refulare.

Aspiraţia gazului (linia *ab*) are loc presiunea constantă P_a, la deplasarea pistonului din poziţia *A* în poziţia *B*.

Comprimarea gazului (linia *bc*, bc_1 şi bc_2 la comprimarea izotermă, respectiv politropă şi adiabată) are loc la deplasarea pistonului din poziţia *B* în poziţia *C*.

Refularea gazului (linia *cd*, c_1d sau c_2d) are loc la presiunea constantă p_r, la deplasarea pistonului din poziţia *C* în poziţia *A*. Cînd pistonul ajunge în poziţia *A*, întregul volum de gaz aspirat este refulat, după care ciclul de comprimare se reia.

Diagrama reală a compresorului tehnic. Compresorul tehnic nu refulează întreaga cantitate de gaz aflată în cilindru; între piston şi cilindru rămîne de o parte şi alta a acestuia cîte un spaţiu numit

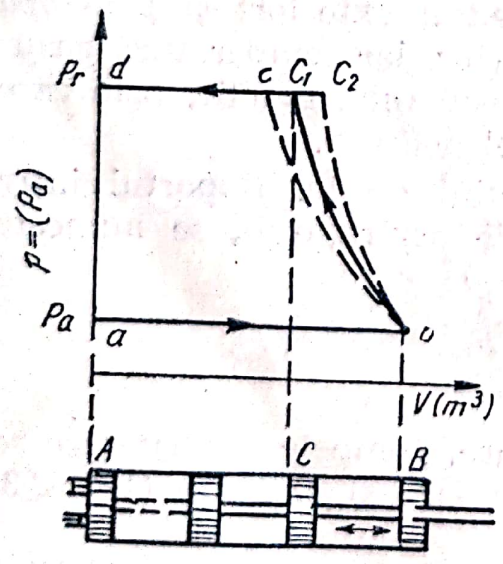

Fig. I.18. Diagrama compresorului teoretic.

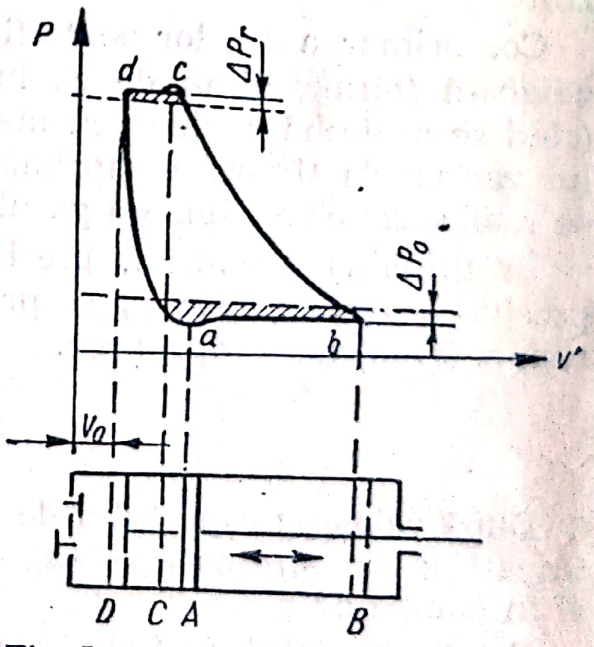

Fig. I.19. Diagrama reală a compresorului tehnic.

Scanned with OKEN Scanner

spațiu mort v_0. Supapele determină apariția unor căderi de presiune la trecerea gazului prin ele Δp_a, Δp_r.

Fazele ciclului de comprimare sînt reprezentate în diagrama din figura 1.19. Curba *ab* reprezintă *faza de aspirație*, curba *bc* reprezintă *faza de comprimare*, curba *cd* reprezintă *faza de refulare* și curba *da* reprezintă *faza de destindere*. Aria suprafeței *abcda* este egală cu lucrul mecanic necesar comprimării.

Comprimarea în trepte. În timpul comprimării, temperatura gazelor crește. Ea nu trebuie să depășească o anumită limită (200°C), ceea ce presupune că într-un cilindru nu se poate depăși o anumită valoare a raportului de comprimare. Temperatura ridicată a gazului duce la pierderea calităților lubrifiante ale uleiurilor, la creșterea consumului de energie necesar comprimării, la scăderea randamentului volumic. În mod obișnuit, raportul de comprimare într-un cilindru este cuprins între 3 și 4. Pentru comprimarea gazelor de la presiuni mici la presiuni mari se folosește *comprimarea în trepte*.

Principiul de funcționare a unui compresor în trepte constă în comprimarea gazelor în serie, în mai multe trepte, cu răcirea lor între trepte (fig. 1.20, *a*). Diagrama comprimării în trepte este reprezentată în figura 1.20, *b*. În treapta I-a (cilindrul *1*), gazul este aspirat după curba *ab*, comprimat după curba politropică *bc* pînă la presiunea p_1 și refulat după curba *cd*. Răcirea gazului se face izobar într-un răcitor, pînă la temperatura inițială de aspirație. În treapta a II-a (cilindrul *2*), gazul este aspirat după curba *ef*, com-

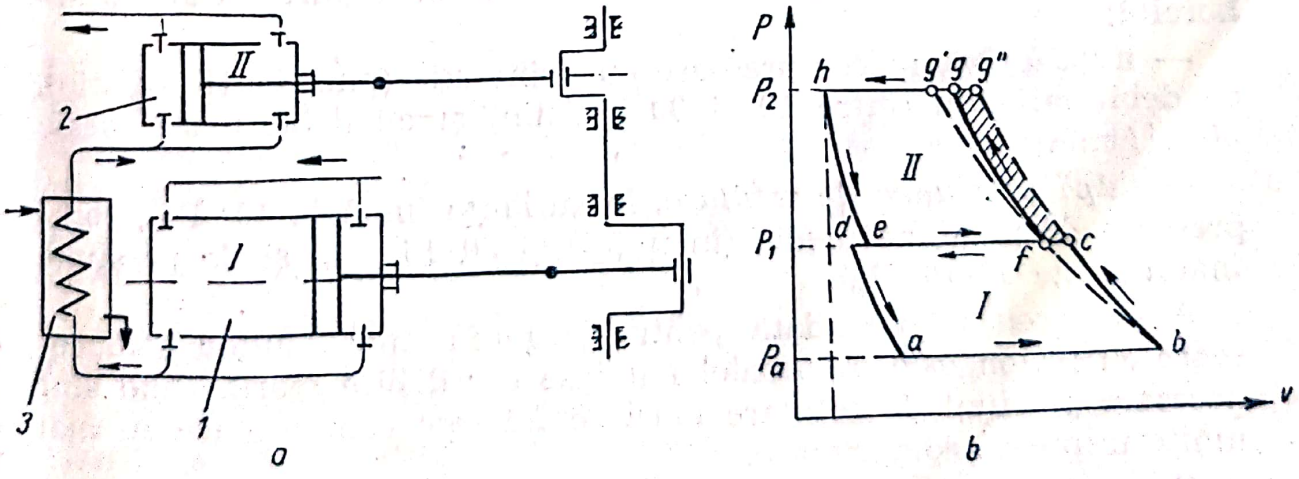

Fig. I.20. Schema comprimării în trepte:
a — schema de principiu; *1* — treapta I-a a decomprimare; *2* — treapta a II-a de comprimare; *3* — răcitor între treptele de comprimare; *b* — diagrama comprimării în trepte.

Scanned with OKEN Scanner

primat după curba *fg* la presiunea p_2, refulat după curba *gh*, răcit izobar, după care ciclul de comprimare se reia dacă mai sînt şi alte trepte de comprimare.

Din analiza diagramei rezultă că faţă de comprimarea într-o singură treaptă se obţine o *economie de lucru mecanic proporţională* cu aria haşurată.

În practică, numărul treptelor de comprimare nu este mai mare de 6.

Pentru un compresor în trepte, cu acelaşi raport de comprimare în fiecare treaptă, numărul de trepte *n* se determină cu formula:

$$r^n = \frac{p_r}{p_a} \qquad (1\text{-}5)$$

Clasificarea compresoarelor cu piston. Compresoarele cu piston se clasifică după următoarele criterii:

— *după numărul de feţe active* ale pistonului, în compresoare cu simplu efect şi cu dublu efect;

— *după numărul treptelor de comprimare,* în compresoare cu o singură treaptă de comprimare (r=2—8), cu două trepte de comprimare (r=8—50) şi cu mai multe trepte de comprimare (r=50—1 000);

— *după poziţia axului cilindrilor,* în compresoare cu cilindrii în poziţie orizontală, în poziţie verticală, în formă de V etc.;

— *după aşezarea cilindrilor treptelor de comprimare,* în compresoare cu cilindrii aşezaţi consecutiv (în serie) pe acelaşi ax şi cu cilindrii aşezaţi paralel pe aceeaşi parte sau de o parte şi alta a arborelui;

— *după debit,* în compresoare cu debit mic (pînă la 10 m^3/min), cu debit mijlociu (între 10 şi 30 m^3/min) şi cu debit mare (peste 30 m^3/ min);

— *după presiunea de refulare,* în suflante (pînă la 10^5 Pa), compresoare de presiune medie (între 10^5 şi $50 \cdot 10^5$ Pa) şi de presiune înaltă (peste $50 \cdot 10^5$ Pa).

Asamblarea recomandată pentru legarea mai multor compresoare cu piston este în paralel (cînd se cer debite mari). Cînd sînt necesare presiuni de refulare mari se folosesc compresoare cu mai multe trepte de comprimare.

Compresoarele cu piston se folosesc pentru comprimarea şi transportul unor debite mici de gaz la presiuni de refulare mari. Ele au turaţii relativ mici, debitează neuniform şi au dimensiuni mari.

Scanned with OKEN Scanner

b. Pompe de rotaţie pentru gaze

Pompele rotative pentru gaze comprimă gazele la presiuni nu prea ridicate. Constructiv sînt asemănătoare pompelor rotative pentru lichide şi funcţionează pe baza aceluiaşi principiu: în spaţiul închis delimitat de elementele în mişcare şi carcasa pompei, gazul este aspirat, comprimat şi evacuat din pompă.

Compresorul rotativ cu palete are aceleaşi părţi componente şi acelaşi principiu de funcţionare ca şi pompa cu palete culisante. Compresorul este prevăzut cu o manta de răcire cu apă şi cu un număr mai mare de palete.

Aceste compresoare se fabrică pentru presiuni pînă la $4 \cdot 10^5$ Pa şi debite între 140 şi 4 000 m^3/h. Frecarea paletelor de corpul pompei consumă o cantitate mare de energie, provoacă uzura paletelor şi face zgomot.

Pompa cu inel lichid (fig. I.21) are un rotor cu palete fixe *2*. montat excentric în carcasă. Pe pereţii frontali ai carcasei se află spaţiile de aspiraţie *3* şi de refulare *4*. În pompă se introduce lichid pînă la un anumit nivel. La rotirea rotorului se formează un inel de lichid, care închide împreună cu paletele rotorului, celule a căror volum crescînd în zona de aspiraţie, creează o depresiune care determină aspiraţia gazului. În zona de refulare volumul celulelor se micşorează, gazul fiind comprimat şi refulat.

Lichidul introdus în pompă se alege în funcţie de gazul comprimat şi transportat (apă pentru gaze obişnuite, acid sulfuric pentru clor etc.).

Aceste pompe realizează debite pînă la 8000 m^3/h şi presiuni pînă la $20 \cdot 10^5$ Pa; sînt indicate pentru comprimarea şi tansportul gazelor corosive sau explozive. Între rotorul cu palete şi carcasă nu există frecare, lipsind deci ungerea. Randamentul acestor pompe este mic (0,45).

Pompele rotative pentru gaze realizează debite uniforme, au un gabarit mic, sînt mai ieftine. Ele nu pot realiza rapoarte de comprimare mari (max. 7), au randament mic (0,35—0,65), necesită o execuţie foarte precisă la montare şi urmărire atentă în exploatare.

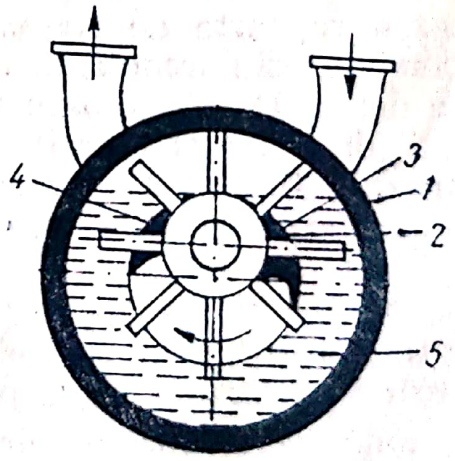

Fig. I.21. Schema compresorului cu inel lichid:
1 — carcasă; 2 — rotor; 3 — spaţiu de aspiraţie; 4 — spaţiu de refulare; 5 — inel de lichid.

Scanned with OKEN Scanner

c. Pompe centrifuge pentru gaze

Pompele centrifuge pentru gaze funcţionează pe baza aceluiaşi principiu ca şi pompele centrifuge pentru lichide; sub acţiunea forţei centrifuge, care apare la rotirea cu turaţie mare a unui rotor sau sistem de rotoare într-o carcasă, gazul este împins de la centru spre periferie, colectat într-o carcasă melcată, de unde este dirijat în conducta de refulare. În centrul rotorului se creează o depresiune care face ca o nouă cantitate de gaz să fie aspirat.

Ventilatoare. Pompele centrifuge pentru gaze cu un singur rotor, care realizează rapoarte de comprimare mici între 1 şi 1,1 se numesc ventilatoare centrifugale. Rotorul ventilatorului poate fi *radial* de tip închis prevăzut cu un număr mare de palete curbate (ventilatorul radial), sau *axial,* cînd este prevăzut cu palete sub formă de elice (ventilatorul axial). Ventilatoarele folosite la aspirarea (evacuarea) gazelor din încăperi se numesc *exhaustoare.*

Suflante centrifugale. Pompele centrifuge pentru gaze care funcţionează cu rapoarte de comprimare între 1,1 şi 3 se numesc suflante centrifugale. Ele pot fi cu un singur rotor sau cu mai multe rotoare de dimensiuni egale, fără răcirea intermediară a gazelor între rotoare. Turbosuflantele se folosesc cînd este necesară vehicularea unor debite mari de gaze la presiuni de refulare mici.

Compresoarele centrifugale propriu-zise *(turbocompresoarele)* sînt formate din mai multe trepte de comprimare şi realizează rapoarte de comprimare mai mari decît 3 (o treaptă de comprimare este formată din 2—4 rotoare de dimensiuni egale; un rotor realizează rapoarte de comprimare între 1,2 şi 1,4). Datorită creşterii presiunii din treaptă în treaptă, volumul gazului se micşorează ceea ce determină ca rotoarele treptelor de comprimare să aibă dimensiuni (diametre şi lăţimi) din ce în ce mai mici. Raportul de comprimare mai mare decît 3 realizat într-o treaptă de comprimare determină încălzirea gazului, ceea ce impune răcirea intermediară a acestuia (între treptele de comprimare).

Debitul turbocompresoarelor poate să ajungă pînă la 300 m^3/s; turaţia turbocompresoarelor poate să depăşească 12 000 rot/min asigurînd realizarea unor presiuni de refulare peste $150 \cdot 10^5$ Pa.

Faţă de compresoarele cu piston, compresoarele centrifugale ocupă un spaţiu mic şi necesită fundaţii reduse; debitul lor este uniform, iar gazul nu se impurifică cu ulei de ungere; ele sînt mai flexibile şi mai sigure în exploatare, implicînd cheltuieli de exploatare mai mici şi putîndu-se automatiza uşor. Trebuie precizat însă că funcţionarea stabilă a unui compresor centrifugal este limitată

Scanned with OKEN Scanner

de un debit minim de alimentare, pentru condiţiile de funcţionare date. Dacă debitul scade sub o anumită valoare, denumită *„limită de pompaj"*, funcţionarea compresorului devine instabilă (au loc şocuri de presiune care determină bătăi în compresor, iar periodic are loc întreruperea debitării. Pentru înlăturarea acestui fenomen, compresoarele centrifugale sînt prevăzute cu dispozitive automate care determină fie scăderea presiunii în sistem, fie reducerea turaţiei, fie deschiderea unui circuit auxiliar care să asigure refularea gazului.

d. Pompe de vid

Unele procese tehnologice necesită presiuni a căror valori sînt sub valoarea presiunii atmosferice, adică impun realizarea unui vid. Pentru obţinerea vidului se pot folosi toate tipurile de pompe pentru gaze studiate; folosirea lor este condiţionată de valoarea vidului care trebuie realizat. Pompele de vid aspiră într-un spaţiu închis (în care trrebuie realizat vidul) şi refulează la presiunea atmosferică.

Pompele de vid cu piston se împart în pompe de *vid uscate,* care aspiră numai gaze realizînd un vid de 96—99,9% (presiunea remanentă de 30—10 mm Hg) şi pompe de *vid umede,* care aspiră amestec de gaze şi lichide realizînd un vid de 80—85% (presiune remanentă 160—110 mm Hg).

Pompele de vid rotative produc un vid mic (presiune remanentă 700—730 mm Hg). *Pompa de vid cu inel lichid* realizează un vid de 95%. Pentru a realiza un vid cît mai mare trebuie ca temperatura lichidului să fie cît mai joasă.

Pompele de vid cu jet (ejectoarele) fac parte din categoria pompelor pentru gaze fără ele-

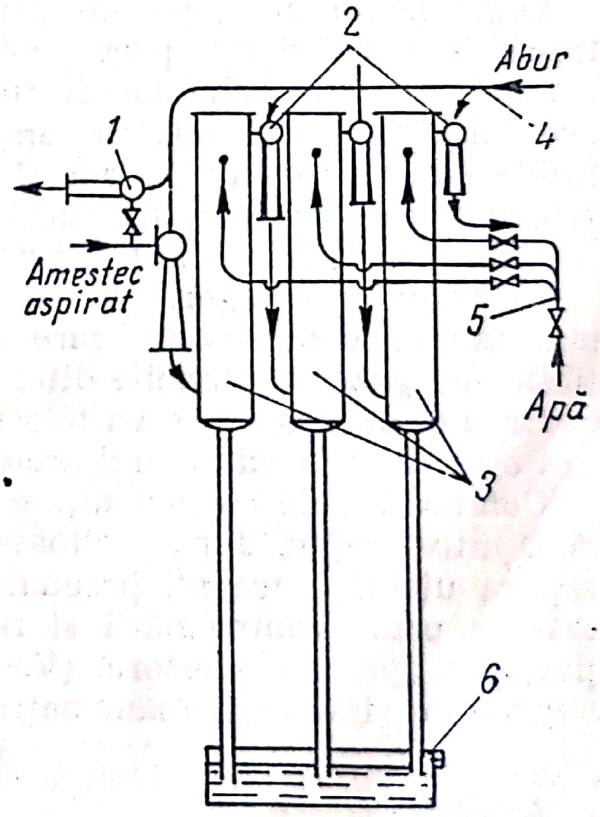

Fig. I.22. Schema bateriei de ejectoare:
1 — ejector de pornire; *2* — ejectoare; *3* — condensatoare barometrice; *4* — conducta de alimentare cu fluid motor (abur); *5* — conducta de alimentare cu apă de răcire; *6* — închidere hidraulică.

Scanned with OKEN Scanner

mente mobile. Exemplul cel mai simplu de astfel de pompă îl constituie trompa de vid utilizată în laborator.

Ejectoarele cu abur cu o singură treaptă realizează un vid de pînă la 90%. Pentru realizarea unui vid mai înaintat de 90% se utilizează o *baterie de ejectoare* (fig. I.22).

3. NORME DE PROTECȚIA MUNCII, DE PREVENIRE ȘI STINGERE A INCENDIILOR

Pe conductele de aspirație și de refulare ale pompelor se vor monta robinete corespunzătoare pentru izolarea, pornirea și oprirea pompelor, precum și manometre pentru controlul presiunii. Pe conductele de aspirație se vor monta site (filtre) pentru reținerea și evitarea intrării în pompă a unor corpuri solide; pe conducta de refulare se vor monta armături de sens unic, precum și dispozitive de siguranță (supape de siguranță, manometre cu contact). În punctele cele mai de jos ale conductelor de aspirație și de refulare și în corpul pompei se vor monta robinete de golire.

Organele de mișcare ale pompelor (arbori, cuplaje, curele de transmisie etc.) vor fi prevăzute cu apărători corespunzătoare.

Pompele care vehiculează fluide inflamabile și explozive vor avea echipamentul electric antiexploziv, iar cele care transportă fluide corosive și toxice vor fi confecționate din materiale anticorosive și prevăzute cu apărători pentru prevenirea stropirilor. Toate pompele vor fi legate la priza de pămînt.

Se interzice categoric montarea în aceeași încăpere a două sau mai multor compresoare care transportă gaze explozive incompatibile sau gaze inflamabile diferite.

Ca ulei de ungere se va folosi numai uleiul indicat de constructor sau asimilat acestuia avînd aceleași calități.

Compresoarele cu mai multe trepte de comprimare vor fi prevăzute între trepte, după răcitoare, cu vase separatoare în care se va separa uleiul antrenat, precum și picăturile de lichid (apă) rezultate în urma comprimării și răcirii gazului; periodic se va face purjarea (golirea) acestora. (Vasele separatoare vor fi prevăzute cu supape de siguranță, manometre de control și robinete de purjare).

Aplicații

1. Un compresor are raportul de comprimare 3,5. Care va fi presiunea de refulare, știind că presiunea citită la manometrul de pe conducta de aspirație este $2 \cdot 10^5$ Pa, iar presiunea atmosferică este de $1{,}01 \cdot 10^5$ Pa? **R:** $10{,}535 \cdot 10^5$ Pa.

Scanned with OKEN Scanner

2. Un compresor comprimă un gaz de la presiunea absolută de $2 \cdot 10^5$ Pa. la presiunea absolută de $54 \cdot 10^5$ Pa. Să se afle numărul de trepte de comprimare știind că raportul de comprimare pe o treaptă este 3.

R: 3 trepte.

B. SEPARAREA SISTEMELOR ETEROGENE

Sistemele eterogene sînt formate din cel puțin două faze*; faza *dispersă* (discontinuă sau internă) care se află răspîndită într-o stare de divizare fină în cea de-a doua fază, numită *dispersantă* (continuă sau externă). Faza dispersantă determină starea sistemului eterogen: *gazos, lichid și solid*. Elementele de volum ale fazei disperse se numesc *bule* pentru gaze, *picături* pentru lichide și *granule* (particule) pentru solide.

Separarea sistemelor eterogene în fazele componente se face pentru a obține una sau ambele faze în stare cît mai pură, și pentru recuperarea fazei disperse, pentru protecția aparatelor contra eroziunii.

Separarea sistemelor eterogene se realizează sub acțiunea diferențiată a unor cîmpuri de forțe (gravitaționale, centrifugale, electrice, acustice etc.) asupra fazelor de densități diferite sau folosind un mediu de filtrare care reține faza dispersă.

1. SEPARAREA SISTEMELOR ETEROGENE LICHIDE

Sistemele eterogene lichide sînt: suspensiile, emulsiile și spumele. Mediul de dispersie este lichid; faza dispersată este solidă (suspensii), lichidă (emulsii) și gazoasă (spume).

a. Sedimentarea

Sedimentarea este operația de separare a sistemelor eterogene în fazele componente sub acțiunea diferențiată a forței gravitaționale asupra fazelor de densități diferite. Separarea prin sedimentare se

* Faza este o parte dintr-un sistem caracterizată printr-o compoziție omogenă și proprietăți fizice bine determinate, diferite de proprietățile celorlalte părți ale sistemului și care poate fi separată de acestea prin suprafețe de separare.

Scanned with OKEN Scanner

face cu atît mai uşor cu cît diferenţa dintre densităţile fazelor este mai mare.

Faza discontinuă obţinută în urma sedimentării se numeşte *sediment*, iar faza continuă se numeşte *decantat*. Îndepărtarea decantantului, după ce a avut loc sedimentarea, se numeşte *decantare*.

Factorii care influenţează sedimentarea se referă la natura, proprietăţile şi concentraţia fazei solide (densitate, granulometrie, structură etc.), la natura şi proprietăţile fazei lichide (densitate, viscozitate etc.), la proprietăţile decantatului şi sedimentului (grad de impurificare reciprocă etc.). la parametrii de funcţionare (mers continuu sau discontinuu, temperatură, durată de sedimentare etc.).

Sedimentarea se supune legilor mişcării corpurilor solide prin fluide care opun rezistenţă mişcării. Particulele care sedimentează se vor mişca la început accelerat; după un anumit timp, cînd rezistenţa datorită frecării va echilibra acţiunea gravitaţiei, ele se vor mişca uniform cu o viteză constantă, numită *viteză de sedimentare*. Viteza se poate mări prin creşterea diametrului particulelor (folosire de coagulanţi), creşterea diferenţei dintre densităţile fazelor (folosire de diluanţi) sau scăderea viscozităţii fazei continue (adăugare de diluanţi, modificarea temperaturii de lucru).

Utilajele folosite pentru separarea sistemelor eterogene lichid-solid prin sedimentare se numesc *decantoare*. Ele pot fi cu *funcţionare discontinuă* (recipiente de formă cilindrică sau paralelipipedică, în care alimentarea cu suspensie şi îndepărtarea fazelor separate se face discontinuu), cu *funcţionare continuă* (alimentarea cu suspensie şi îndepărtarea fazelor separate se face continuu) şi cu *funcţionare mixtă* (semicontinuă — bazine dreptunghiulare cu fund înclinat, în care alimentarea cu suspensie şi îndepărtarea decantatului se face continuu, iar îndepărtarea sedimentului se face discontinuu). Timpul de staţionare al suspensiei şi viteza de curgere prin aparat se aleg astfel încît separarea celor două faze să se facă corespunzător cerinţelor.

Decantoarele cu funcţionare continuă se folosesc pentru separarea unor debite mari de suspensii, cu un conţinut ridicat de fază solidă sau cînd sedimentul urmează să fie folosit în alte operaţii.

Decantorul conic (fig. I.23, *a*) se alimentează cu suspensie central prin pîlnia *4*. Sedimentarea are loc în timpul parcurgerii radiale a aparatului. Decantatul este colectat şi evacuat continuu prin rigola circulară *2*, iar sedimentul este evacuat prin sifonul basculant *3*.

Scanned with OKEN Scanner

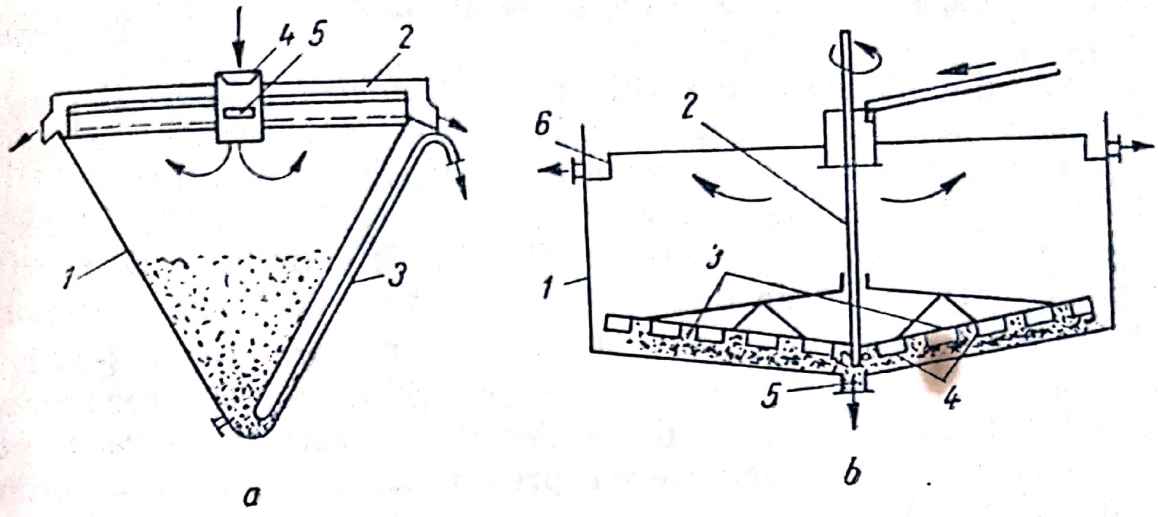

Fig. I.23. Schema decantoarelor cu funcţionare continuă:
a — decantorul conic; *1* — manta conică; *2* — rigolă circulară; *3* — sifon basculant; *4* — pîlnie de alimentare; *5* — plutitor.

Decantorul cu braţe (decantorul DORR) (fig. I.23, *b*) este prevăzut cu un ax vertical pe care sînt fixate braţe radiale înclinate, prevăzute cu raclete şi care se roteşte cu viteză mică deplasînd sedimentul către gura de evacuare. Decantatul se colectează în jgheabul 6, de unde se evacuează continuu. Alimentarea cu suspensie se face central; sedimentarea are loc în timpul parcurgerii radiale a aparatului. Aceste decantare permit separarea unor debite mari de suspensii (pînă la 3 000 m^3/zi), ocupă spaţii mari în plan orizontal; puterea consumată pentru antrenarea braţelor este 0,2—0,5 kW.

Montarea suprapusă într-o manta cilindrică comună a mai multor decantoare cu braţe, permite obţinerea unor aparate compacte şi economisirea suprafeţelor de construcţie. Un astfel de aparat este format din 2—5 etaje, a căror diametru este de 3÷18 m; puterea consumată este de 0,7÷4 kW.

Decantoarele nu se folosesc pentru suspensii care sedimentează greu sau cînd nu se admit pierderi de lichid în sediment.

b. Filtrarea

Filtrarea este operaţia de separare a sistemelor eterogene cu ajutorul unor medii filtrante (suprafeţe sau straturi filtrante). Faza dispersantă care trece prin mediul filtrant se numeşte *filtrat,* iar faza solidă reţinută de mediul filtrant se numeşte *precipitat.*

Pentru ca filtrarea să se producă este necesar ca diferenţa de presiune deasupra şi sub mediul filtrant să fie mai mare decît re-

Scanned with OKEN Scanner

zistența pe care stratul de precipitat și mediul filtrant o opun curgerii.

Operația de filtrare este rezultatul următoarelor operații care au loc succesiv sau concomitent: *sedimentare* (particulele se depun deasupra mediului filtrant), *cernere* (particulele cu dimensiuni mai mari decît porii mediului filtrant sînt reținute la suprafața acestuia sau de către stratul de precipitat) și *adsorbție* (mediul filtrant reține particulele solide de dimensiuni mai mici decît porii acestuia).

Ciclul de filtrare comportă etapele de *filtrare propriu-zisă*, de *spălare a precipitatului* (purificarea precipitatului sau recuperarea integrală a filtratului folosind un lichid adecvat) și de *regenerare a mediului filtrant* (îndepărtarea precipitatului și recondiționarea mediului filtrant).

Mediile de filtrare des folosite sînt țesăturile (textile, vegetale, animale, minerale), membranele (animale, hîrtia pergament), plăcile poroase (porțelan, argilă, cuarț), straturile fibroase (celuloza, azbest, lînă), straturile granulare (nisip, cărbune activ), susținute de un suport. Ele trebuie să rețină cît mai complet faza solidă, să determine o rezistență hidraulică mică, să aibă rezistență mecanică și chimică bună, să permită viteze de filtrare mari, să reziste la temperatura de filtrare, să se regenereze ușor, să fie accesibile și ieftine.

Factorii care influențează filtrarea se referă la caracteristicile sistemului eterogen (natura și proprietățile suspensiei, granulometria și concentrația fazei solide), la caracteristicile mediului filtrant (natură, grosime, dimensiune a porilor), la caracteristicile precipitatului (compresibilitate, omogenitate), la condițiile de filtrare (viteză de filtrare, temperatură, presiune, mod de operare), la condițiile spălării (natura și cantitatea lichidului de spălare, durată) și la condițiile de regenerare a mediului filtrant (mod de regenerare, durată).

Operația de filtrare este caracterizată cantitativ prin *viteza de filtrare*, care reprezintă volumul de filtrat care trece prin unitatea de suprafață a mediului filtrant, în unitatea de timp ($m^3/m^2 \cdot s$). Ea depinde de diferența de presiune, de temperatură, de structura, caracterul și grosimea stratului de precipitat, de compoziția suspensiei etc.

Filtrarea poate avea loc la *diferență de presiune constantă* (viteza de filtrare este maximă la începutul filtrării), la *viteză de filtrare constantă* (diferența de presiune este maximă la sfîrșitul filtrării) și *mixt* (inițial, la viteza de filtrare constantă și apoi la diferență de presiune constantă).

Scanned with OKEN Scanner

În practică, cel mai des se folosește filtrarea la diferență de presiune constantă (creșterea stratului de precipitat determină scăderea debitului filtratului la o valoare sub care continuarea filtrării nu mai este economică).

Aparatele în care se realizează operația de filtrare se numesc *filtre*. Ele se clasifică după următoarele criterii:

— după modul de funcționare pot fi: discontinue și continue;

— după modul de creere a forței motric (presiunea statică a stratului de suspensie), pot fi: sub vid și sub presiune;

— după mediul filtrant, pot fi: cu suprafață filtrantă și cu strat filtrant;

— după caracteristicile constructive, pot fi: cu strat granular, nuce, presă, celulare rotative etc.

Filtrele cu funcționare discontinuă concentrează o suprafață mare de filtrare într-un volum relativ mic.

— *Filtrele cu strat granular* (fig. I.24) conțin un strat filtrant (granule de nisip, marmură, cărbune) susținut de straturi granulare de dimensiuni mai mari sau de plăci perforate prevăzute cu crepine, care au fante ale căror dimensiuni nu permit trecerea granulelor stratului filtrant. Ele servesc la filtrarea unor debite mari de suspensii (filtrarea apei), cer însă multă manoperă la spălarea și regenerarea stratului filtrant.

— *Filtrele nuce* (fig. I.25) sînt recipiente cilindrice sau paralelipipedice, cu sau fără capac, prevăzute cu suprafețe filtrante. Precipitatul reținut de suprafața filtrantă se îndepărtează periodic după ce a fost spălat și uscat. Ele sînt construcții simple, ușor de supravegheat și controlat; uscarea precipitatului este aproape completă, iar îndepărtarea lui este simplă, însă productivitatea este redusă necesitînd manoperă multă la descărcarea precipitatului.

— *Filtrele presă cu rame și plăci* (fig. I.26) sînt formate din rame și plăci de formă dreptunghiulară, circulară sau pătrată de dimensiuni egale, care alternează și între care se așază pînză filtrantă.

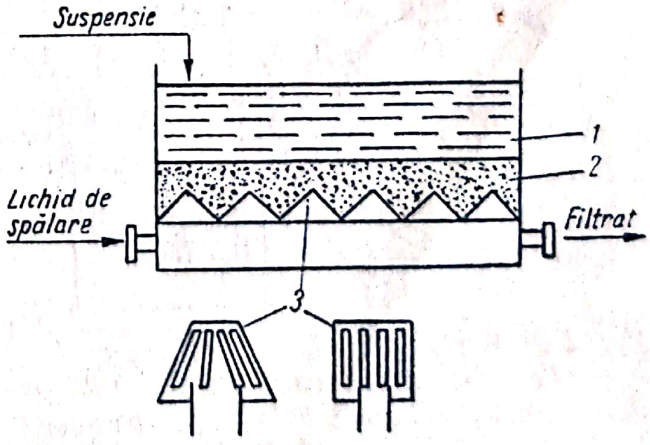

Fig. I.24. Schema filtrului cu strat granular:
1 — recipientul filtrului; 2 — strat granular; 3 — crepine.

Scanned with OKEN Scanner

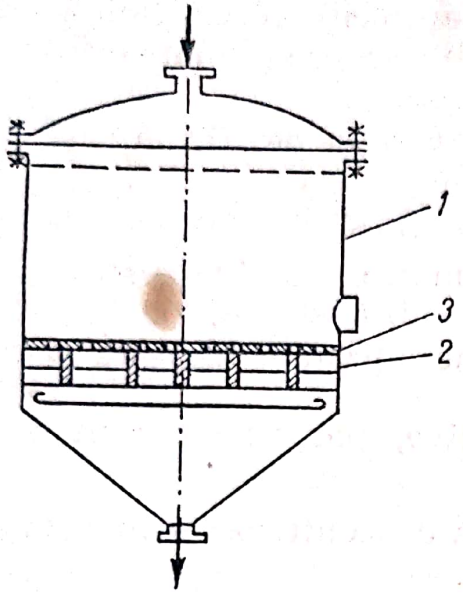

Fig. I.25. Schema filtrului nuce:

1 — recipientul filtrului; *2* — suport de susținere; *3* — suprafață filtrantă.

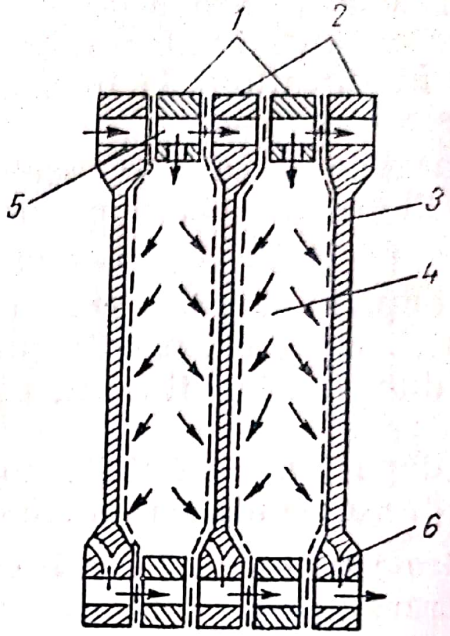

Fig. I.26. Schema filtrului presă:

1 — rame; *2* — plăci; *3* — pînză filtrantă; *4* — cameră de filtrare; *5* — canale de alimentare; *6* — canale de evacuare.

Descărcarea precipitatului și regenerarea suprafeței filtrante se face prin demontarea filtrului.

Filtrele cu funcționare continuă se caracterizează prin faptul că etapele care compun operația de filtrare se efectuează succesiv, continuu fără oprirea și demontarea filtrului.

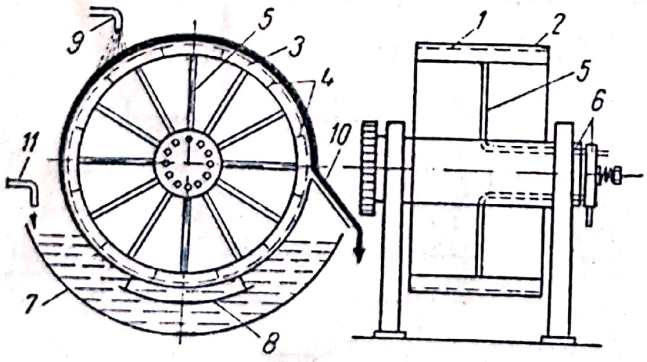

Fig. I.27. Schema filtrului celular cu tambur rotativ:

1 — cilindru exterior; *2* — pînză filtrantă; *3* — celule filtrante; *4* — pereți radiali; *5* — conductă de legătură; *6* — capul de distribuție; *7* — cuva cu suspensie; *8* — agitator; *9* — stropitoare pentru lichid de spălare; *10* — cuțit; *11* — alimentare cu suspensie.

— *Filtrul celular cu tambur rotativ* (fig. I.27) are un tambur format din doi cilindri coaxiali. Cilindrul exterior este perforat; peste el se întinde pînza filtrantă. Spațiul inelar dintre cilindrii este împărțit de pereți radiali în celule. Fiecare celulă comunică prin cîte un tub de legătură cu capul de distribuție.

Capul de distribuție este format dintr-un disc mobil (fig. I.28, *a*) fixat la capătul tamburului, prevăzut cu găuri

care sînt capetele tuburilor de legătură și dintr-un disc fix (fig. I.28, *b*) prevăzut cu deschideri care fac legătura cu conductele de vid și de aer comprimat. Găurile discului mobil se suprapun cu deschiderile din discul fix.

La rotirea tamburului, fiecare celulă trece prin toate fazele filtrării.

Tamburul are un diametru de 1,5—3 m și o lungime între 1 și 4,4 m. Suprafața filtrantă este de 5—40 m².

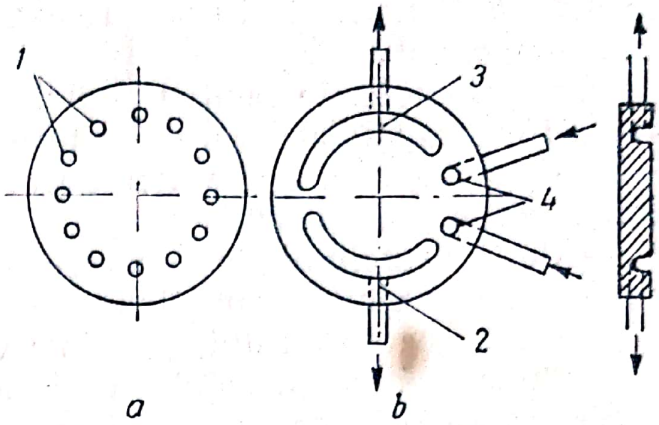

Fig. I.28. Schema capului de distribuție: *a* — disc mobil; *b* — disc fix; *1* — capetele tuburilor de legătură; *2* — deschidere pentru filtrat; *3* — deschidere pentru lichid de spălare; *4* — conducte de aer comprimat.

Consumul de energie pentru rotirea tamburului este de 0,5—4 kW. Ele funcționează la un vid de circa 500—700 mm Hg.

c. Centrifugarea

Centrifugarea este operația de separare a unui sistem eterogen în cîmp de forțe centrifuge.

Asupra unui corp de masă m care se rotește în jurul unui ax la distanța R cu viteza periferică w (viteza unghiulară ω) acționează forța centrifugă F_c a cărei valoare este:

$$F_c = \frac{mw^2}{R} = m\omega^2 R = m(2\pi n)^2 R \qquad \text{(I-6)}$$

Cîmpul gravitațional acționează cu forța gravitațională $F_g = m \cdot g$.

Raportul dintre intensitatea celor două cîmpuri se numește *factor de centrifugare* (eficacitate sau separare) z_c:

$$z_c = \frac{F_c}{F_g} = \frac{w^2}{R \cdot g} = \frac{\omega^2 R}{g} = \frac{(2\pi n)^2 R}{g} \qquad \text{(I-7)}$$

Pentru o particulă de masă m, forța de gravitație este practic constantă; forța centrifugă se poate mări prin mărirea razei de rotație sau prin mărirea turației. Asupra particulei va acționa o forță rezultantă obținută prin compunerea celor două forțe.

Dacă un sistem eterogen este supus acțiunii unui cîmp de forțe centrifuge, asupra fazelor de densități diferite vor acționa forțe

Scanned with OKEN Scanner

centrifuge de mărimi diferite, realizîndu-se separarea acestuia în fazele componente.

Aparatele folosite pentru centrifugare se numesc centrifuge. Ele se clasifică după următoarele criterii:

— după factorul de centrifugare pot fi: normale, $z_c < 3\,000$ și supercentrifuge, $z_c > 3\,000$;

— după principiul de separare sînt: decantoare și filtrante;

— după modul de funcționare sînt: continue și discontinue;

— după poziția axului, ele sînt: verticale, orizontale și înclinate;

— după susținerea tamburului pot fi suspendate sau sprijinite.

Separarea prin centrifugare se poate realiza după principiul sedimentării sau după principiul filtrării.

Sedimentarea în cîmp de forțe centrifuge se realizează în *centrifuge decantoare*, care în principiu sînt formate dintr-un tambur cilindric, de obicei montat vertical, care se rotește în jurul axei

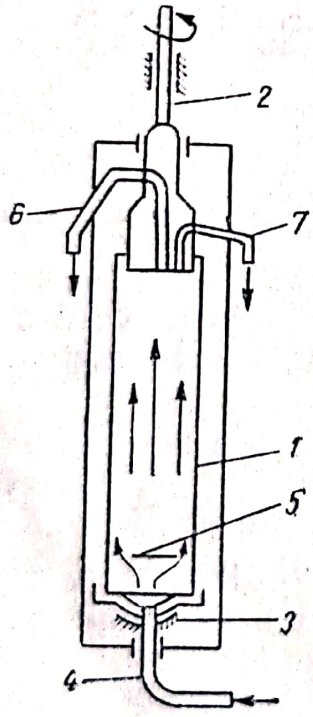

Fig. I.29. Schema supercentrifugei tubulare:
1 — tambur cilindric; *2* — arbore de antrenare; *3* — lagăr de ghidaj; *4* — conducta de alimentare; *5* — disc de distribuție; *6* — evacuare lichid ușor; *7* — evacuare lichid greu.

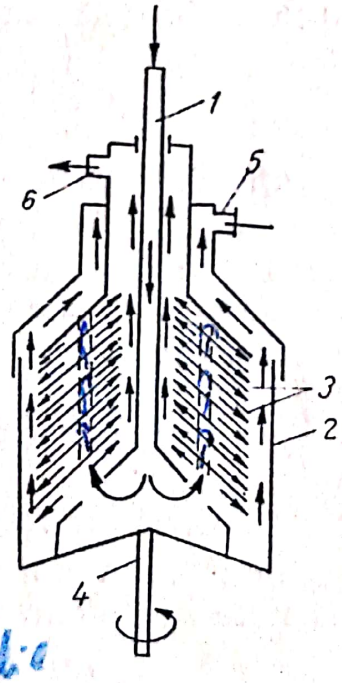

Fig. I.30. Schema separatorului cu talere:
1 — conductă de alimentare; 2 — tambur; 3 — talere; 4 — arbore motor; 5 — evacuare lichid greu; 6 — evacuare lichid ușor.

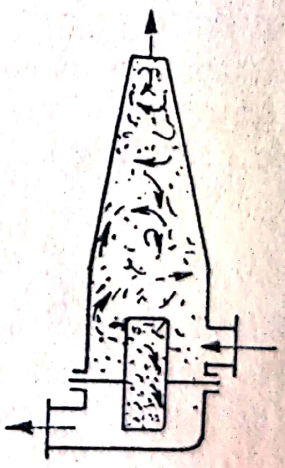

Fig. I.31. Schema hidrociclonului.

sale cu viteză mare. Sistemul eterogen se introduce în interiorul tamburului. Sub acțiunea cîmpului de forțe centrifuge, faza de densitate mai mare se acumulează în strat la pereții tamburului, iar faza de densitate mai mică formează un strat interior concentric. Prin dispozitive adecvate, fazele separate se elimină continuu sau discontinuu din centrifugă. Pentru separarea emulsiilor se folosesc *centrifuge separatoare*.

Sedimentarea în cîmp de forțe centrifuge se realizează cu viteze de sedimentare mari.

Supercentrifuga tubulară (fig. I.29), este centrifuga decantoare reprezentativă, în care separarea fazelor componente se realizează în timpul ridicării suspensiei prin tamburul care se rotește cu turație mare (10 000—50 000 rot/min). Ele se folosesc și ca centrifuge separatoare.

Separatorul cu talere (fig. I.30) este centrifuga separatoare reprezentativă, care are interiorul tamburului compartimentat cu o serie de talere în scopul micșorării distanței pe care trebuie s-o parcurgă fazele (talerele sînt prevăzute cu orificii aproximativ în zona de separare). Turația tamburului este 5 000—10 000 rot/min.

Hidrociclonul (fig. I.31) este un aparat static. Prin introducerea tangențială cu viteză mare în aparat, suspensia capătă o mișcare elicoidală; particulele solide se depun la perete și se elimină ca nămol la partea inferioară, iar curentul de lichid ascendent format în centrul aparatului iese pe la partea superioară. Hidrocicloanele permit separarea particulelor solide cu diamensiuni între 2 și 200 m. Ele au o construcție simplă, o deservire ușoară, dimensiuni reduse, dar necesită un consum de energie ridicat la pomparea lichidului, iar pereții aparatului sînt supuși eroziunii.

Filtrarea în cîmp de forțe centrifuge se realizează în centrifugele filtrante, formate dintr-un tambur perforat în interiorul căruia se fixează o suprafață filtrantă, iar în exterior este protejat de o manta. Prin rotirea tamburului cu turație mare, datorită cîmpului de forțe centrifuge se realizează creșterea vitezei de filtrare și reducerea conținutului final de lichid în precipitat (pînă la 4%).

Centrifugele filtrante cu funcționare discontinuă lucrează în șarje. Ele sînt cu descărcare manuală (fig. I.32, *a*), cînd evacuarea precipitatului se face manual după oprirea centrifugei (se folosesc pentru suspensii cu durată mare de separare) și cu descărcare automată (fig. I.32, *b*), cînd evacuarea precipitatului se face automat la reducerea turației, prin cădere liberă sub

Scanned with OKEN Scanner

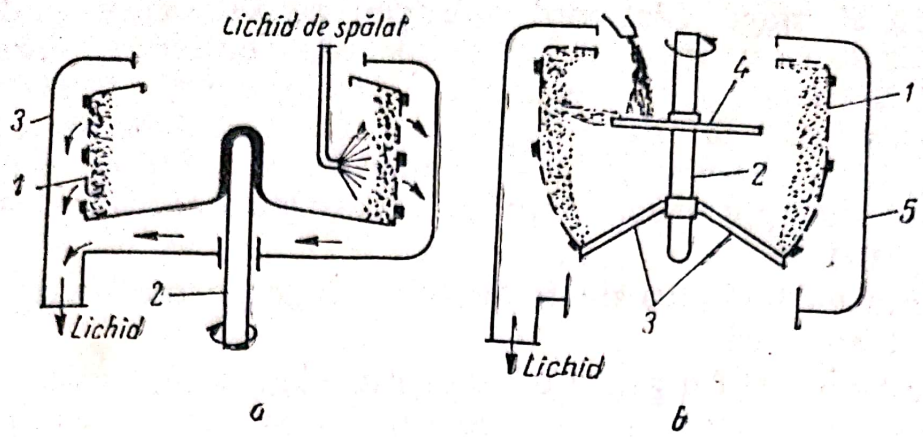

Fig. I.32. Schema centrifugelor cu funcționare discontinuă:
a — centrifuga filtrantă cu descărcare manuală; *1* — tambur perforat; *2* — ax vertical; *3* — manta; *b* — centrifuga filtrantă cu descărcare automată; *1* — tambur; *2* — arbore; *3* — brațe; *4* — disc; *5* — manta.

greutatea proprie (se folosesc pentru suspensii cu durată mică de separare și la care precipitatul trebuie menajat la descărcare).

Centrifugele filtrante cu funcționare continuă execută automat și continuu fazele centrifugării; caracteristica lor principală constă în modul de descărcare a precipitatului.

Centrifuga filtrantă cu funcționare continuă reprezentativă este centrifuga cu tambur dublu (fig. I.33) la care, tamburul dublu este montat pe un ax orizontal. Un servomotor hidraulic comandă, după un program fixat, succesiunea fazelor centrifugării, astfel încît în timp ce într-un compartiment are loc centrifugarea în celălalt are loc spălarea și îndepărtarea precipitatului. Aceste aparate au o productivitate mare.

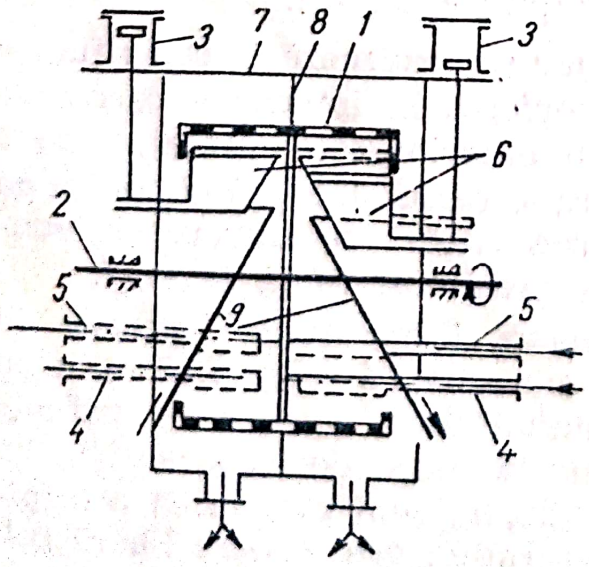

Fig. I.33. Schema centrifugei filtrante cu tambur dublu:
1 — tambur dublu; *2* — arbore; *3* — servomotor hidraulic; *4* — alimentare cu suspensie; *5* — alimentare cu lichid de spălare; *6* — cuțite; *7* — manta; *8* — pereți despărțitori; *9* — plan de evacuare.

Scanned with OKEN Scanner

Sistemele eterogene gazoase au faza continuă în stare gazoasă; cînd faza discontinuă este un solid, sistemul se numește praf sau fum, iar cînd este lichid se numește ceață.

Alegerea procedeului adecvat de separare depinde de natura, dimensiunile și concentrația fazei disperse, de cantitatea supusă separării, de proprietățile fizice ale fazelor componente ale sistemului eterogen gazos. În alegerea procedeului de separare, un rol primordial revine factorului economic.

a. Purificarea mecanică a gazelor

Purificarea mecanică a gazelor se face prin sedimentare, datorită inerției și prin centrifugare.

Separarea prin sedimentare se realizează sub acțiunea gravitației, trecînd gazul cu o viteză mică (0,2—0,4 m/s) prin camere de secțiune și volum mare, numite *camere de sedimentare sau de desprăfuire*. În cameră sînt montate rafturi orizontale (polițe) la distanțe de 40—100 mm una de alta. Sedimentul depus pe polițe se elimină periodic. Camerele de desprăfuire sînt simple, determină o cădere de presiune mică, nu se uzează prin eroziune. Ele sînt folosite pentru separare grosieră (particule cu dimensiuni între 50 și 100 μm) realizînd un grad de separare de 40—70%.

Separarea datorită inerției se bazează pe faptul că întîlnind un obstacol, gazul îl ocolește, în timp ce particulele solide, cu inerție mai mare, lovindu-l, se vor depune pe suprafața acestuia, vor ricoșa sau își vor păstra direcția de mișcare. În figura I.34 sînt reprezentate cîteva tipuri de *separatoare inerțiale*. Ele se utilizează pentru separarea sistemelor care conțin particule cu dimensiuni mai mari de 10—20 m.

Separarea prin centrifugare folosește acțiunea cîmpului de forțe centrifuge; aparatul utilizat are același principiu de funcționare ca și hidrociclonul și se numește *ciclon* (fig. I.35). Factorul de sepa-

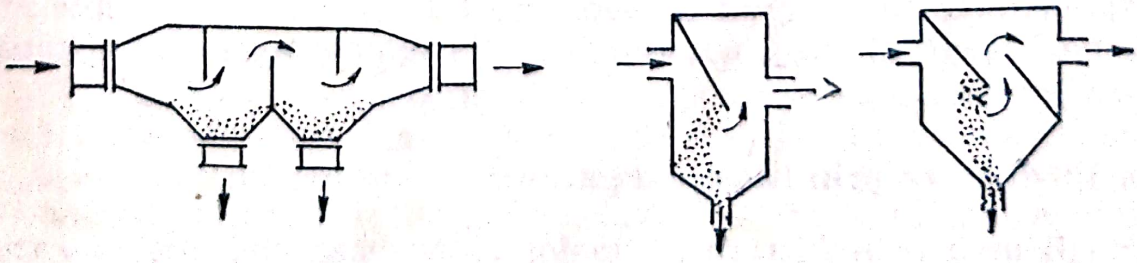

Fig. I.34. Schema separatoarelor inerțiale.

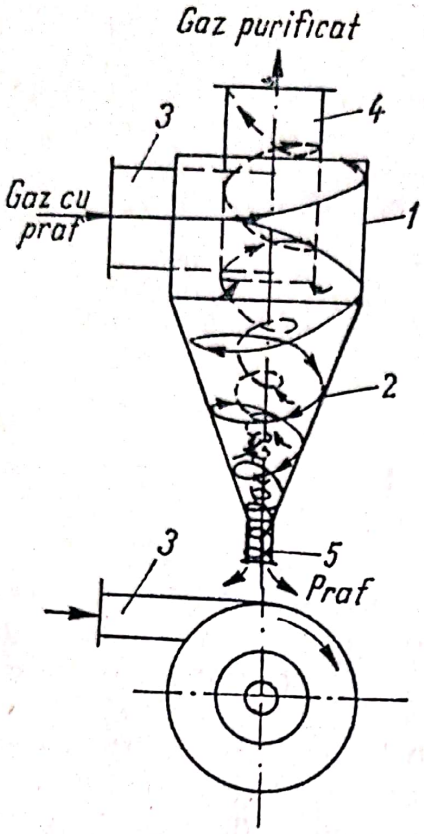

Fig. I.35. Schema ciclonului:
1 — corp cilindric; *2* — corp conic; *3* — alimentare; *4* — evacuare gaz purificat; *5* — evacuare praf.

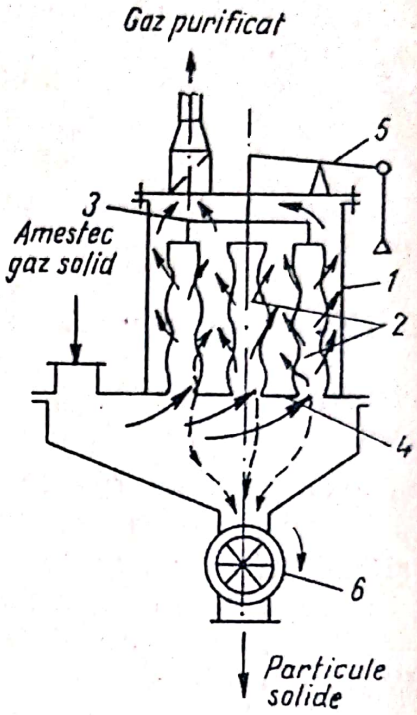

Fig. I.36. Schema filtrului cu saci:
1 — carcasă; *2* — saci; *3* — cadru pentru fixarea sacilor; *4* — placă tubulară; *5* — dispozitiv de scuturare; *6* — dozator.

rare (eficiența ciclonului) este cu atît mai mare cu cît viteza gazului e mai mare (20—30 m/s) și cu cît raza ciclonului este mai mică. Micșorarea razei ciclonului duce la micșorarea productivității. Prin cuplarea în paralel a mai multor cicloane de diametre mici (150—200 mm) se obține o *baterie de cicloane* (multiciclonul) care are o productivitate mare, realizează o separare bună și poate funcționa cu debite variabile. Cicloanele au o construcție simplă, un cost mic de exploatare, au un grad de separare bun (particule cu dimensiuni mai mari decît 10 μm), pot funcționa la temperaturi înalte (pînă la 1 000°C).

b. Purificarea prin filtrare a gazelor

Purificarea prin filtrare a gazelor se bazează pe trecerea gazului brut printr-un mediu filtrant care reține particulele solide.

Filtrul cu saci este utilajul folosit pentru separare (fig. I.36). Particulele solide reţinute pe suprafaţa interioară a sacilor, prin scuturare periodică, cad la partea inferioară a filtrului, de unde se evacuează.

Filtrele moderne se construiesc din mai multe secţiuni; la anumite intervale de timp, fiecare secţiune se scoate din funcţiune şi se curăţă.

Filtrele cu saci au un grad de separare de 94—99% şi suprafeţe de filtrare între 30—120 m^2; sacii au diametre între 190—200 mm şi lungimi între 2—3,5 m. Ele se utilizează la purificarea gazelor uscate; temperatura gazelor este limitată de natura materialului suprafeţei filtrante.

Pentru purificare mai avansată şi pentru gaze fierbinţi şi agresive chimic se folosesc filtre din materiale poroase.

c. Purificarea umedă a gazelor

Purificarea umedă se face aducînd în contact intim sistemul eterogen gazos cu un lichid care se pulverizează sau se distribuie sub forma unui film subţire. Particulele solide se îngreunează prin umezire, se aglomerează prin asociere sau trec în lichidul de spălare.

Turnurile de spălare, denumite şi scrubere sînt turnuri cilindrice verticale cu sau fără umplutură în interior. Lichidul de spălare repartizat pe întreaga secţiune a aparatului, curge de sus în jos. Eficacitatea turnurilor goale este de 60—75%, iar a celor cu umplutură, de 75—85%.

Gradul de separare este mult îmbunătăţit (pînă la 98%) folosind *separatoarele centrifugale* în care gazul intră tangenţial pe la partea inferioară a unui turn gol (fig. I.37) pe pereţii căruia se scurge o peliculă de lichid. Forţa centrifugă face ca particulele solide să se depună pe pereţii aparatului, fiind reţinute şi eliminate odată cu lichidul de spălare.

d. Purificarea electrică a gazelor

Purificarea gazelor care conţin particule de dimensiuni mai mici de 10 μm se face cu ajutorul *filtrelor electrice,* care realizează randamente de separare foarte mari (90—99%). Purificarea electrică se realizează prin *ionizarea gazului* la trecerea printr-un *cîmp electric neuniform,* creat între doi electrozi cărora li se aplică o diferenţă de potenţial de 10 000—60 000 V. Acest cîmp se obţine folosind perechi de electrozi alcătuit din doi cilindri coaxiali, dintr-o

Scanned with OKEN Scanner

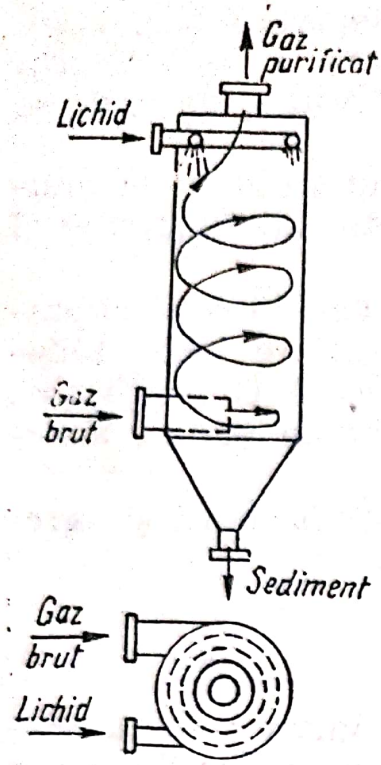

Fig. I.37. Schema separatorului centrifugal.

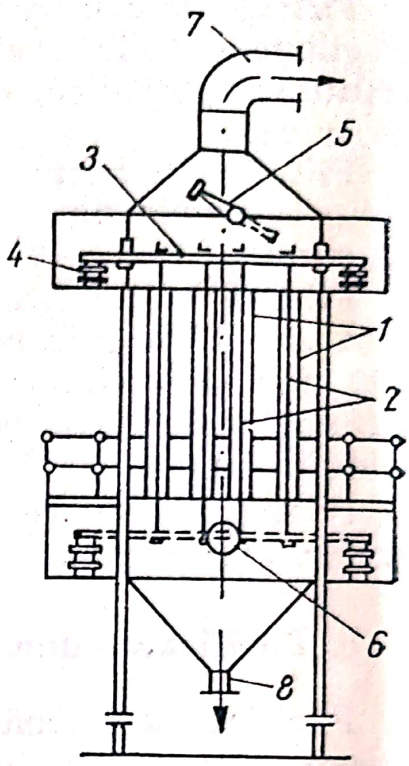

Fig. I.38. Schema filtrului electric tubular:
1 — electrozi de depunere; *2* — electrozi de ionizare; *3* — cadru de susținere; *4* — izolatori; *5* — dispozitiv de scuturare; *6* — alimentare; *7* — evacuare gaz purificat; *8* — evacuare praf.

placă și un cilindru sau electrozi paraleli cu suprafețe mult diferite. Electrodul care provoacă ionizarea gazului se numește *electrod de ionizare;* el este de dimensiune mai mică. Celălalt electrod se numește *electrod de depunere* (de precipitare).

Cîmpul electric creat este mult mai puternic în apropierea electrodului de ionizare decît în apropierea electrodului de depunere. Această neuniformitate se manifestă prin străpungerea parțială a gazului, caracterizată printr-o luminiscență în lungul electrodului de ionizare însoțită de zgomote caracteristice; fenomenul este cunoscut sub numele de *efect corona*. Electrodul de ionizare este legat la polul negativ și va provoca ionizarea negativă a gazului. Faza dispersă va primi sarcini electrice negative, se va deplasa către electrodul de depunere încărcat pozitiv, unde se va descărca și se va depune.

După forma electrozilor, filtrele electrice sînt: filtre tubulare și filtre cu plăci.

Filtrele electrice tubulare (fig. I.38) au ca electrozi de depunere tuburi verticale cu secțiune circulară, pătrată sau hexagonală cu diametre de 150—300 mm, și lungimi de 3—4 m; în interiorul lor este montat electrodul de ionizare care este din sîrmă conductoare cu diametrul de 1,5—2 mm.

Filtrele electrice cu plăci au ca electrozi de depunere plăci de 3—5,5 m lungime, din tablă dreaptă sau ondulată, plase de sîrmă,

Scanned with OKEN Scanner

grătare. Electrozii de ionizare sînt conductori suspendați între plăci.

Filtrele electrice au un consum redus de energie (0,1—0,4 kW la 1 000 m^3 gaz), determină o pierdere mică a presiunii gazului la trecerea prin filtru; uzura aparatului este mică și dă posibilitatea lucrului la temperaturi pînă la 600°C.

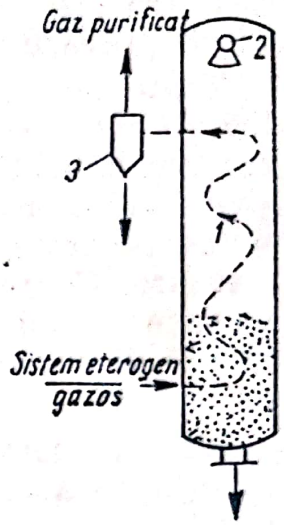

Fig. I.39. Schema instalației de separare sonică acustică.

e. Purificarea sonică (acustică) a gazelor

Procedeele sonice folosesc acțiunea cîmpului sonic (acustic); sub influența undelor acustice cu frecvențe de 1—200 kHz, faza dispersă este supusă unor oscilații cu frecvență apropiată de cea a mediului gazos în care se află, ceea ce determină ciocnirea și unirea lor în aglomerate sau picături de dimensiuni mai mari, ușor de separat prin alte procedee (sedimentare, centrifugare etc.).

O instalație de *separare sonică* (fig. I.39) este formată dintr-un turn de aglomerare *1*, generatorul de unde acustice *2* și un ciclon *3*. Faza dispersă care nu s-a depus în turnul de aglomerare se separă în ciclon. Timpul necesar separării este de 1—5 s; viteza gazului în aparat este de aproximativ 1 m/s.

Sonic se pot separa cu o eficiență ridicată de 80—90% particule cu dimensiuni relativ mici (sub 1 μm); procedeul este aplicabil și gazelor fierbinți (pînă la 500°C), corosive sau explozive.

3. NORME DE PROTECȚIA MUNCII, DE PREVENIRE ȘI STINGERE A INCENDIILOR

Se interzice funcționarea filtrelor sub presiune cu șuruburi lipsă sau filete uzate la capete, cu neetanșeități, precum și strîngerea sau alte intervenții cu filtrele în funcționare (sub presiune).

Filtrele și centrifugele care lucrează cu substanțe toxice, caustice, inflamabile sau explozive vor fi prevăzute cu dispozitive de absorbție și neutralizare, cu echipamente electrice antiexplozive; ele vor fi izolate, iar spațiul va avea ventilație eficientă.

Legăturile între filtre și pompe vor fi confecționate din conducte fixe din materiale corespunzătoare, prevăzute cu armăturile necesare și cu apărători la flanșe. Filtrele sub presiune vor fi prevăzute cu armături de siguranță și cu manometre corespunzătoare.

Scanned with OKEN Scanner

Filtrele și centrifugele cu organe de transmisie sau în mișcare vor fi prevăzute cu apărători de protecție adecvate.

Toate centrifugele vor fi prevăzute cu frînă de oprire, schimbător de curea și capac de închidere. Punerea in funcționare și oprirea centrifugei prin frînare se face în mod gradat și sub supraveghere. Încărcarea centrifugelor în timpul mersului sau spălarea fazei solide separate se face numai cu capacul închis prin pîlnia de alimentare. Controlul tamburului și a materialului din centrifugă se va face numai prin vizori corespunzători amplasați în capac. Toate filtrele și centrifugele care pot fi puse sub tensiune se leagă la priza de pămînt.

Dacă la pornire sau în timpul funcționării filtrele și centrifugele funcționează anormal (oscilații, trepidații, zgomot etc.) se vor opri imediat.

C. AMESTECAREA FLUIDELOR

Amestecarea este operația prin care se pun în contact intim două sau mai multe faze, cu scopul obținerii de amestecuri omogene sau eterogene și intensificării unor procese de schimb de căldură și de masă, a unor reacții chimice.

Amestecarea fluidelor se numește *agitare*; utilajele în care se realizează se numesc *agitatoare*.

Amestecarea este influențată de un număr mare de factori ca natura și proprietățile componenților care se amestecă, debitul și raportul cantitativ al fazelor, modul, intensitatea și durata procesului, scopul amestecării și caracteristicile produselor care se obțin, utilajele folosite și caracteristicile lor geometrice, puterea consumată.

1. HIDRODINAMICA AMESTECĂRII

De cele mai multe ori amestecare se face în vase în care viteza fluidelor este diferită în diverse zone ale vasului. Traseul curentului provocat de mișcarea agitatorului se numește *spectru de curgere*; el conține o serie de *linii de curent* care determină trasee caracteristice, rezultînd următoarele tipuri principale de curgere:

— *Curgere tangențială*, în care lichidul curge paralel cu traseul descris de agitator; efectul de amestecare este minim, iar antrenarea lichidului de către agitator este redusă.

Scanned with OKEN Scanner

— *Curgere radială*, în care lichidul este distribuit de la centru în lungul unor raze; sub agitator, lichidul are o mișcare ascendentă, iar deasupra agitatorului, o mișcare descendentă.

— *Curgere axială*, în care lichidul intră axial în agitator și-l părăsește tot axial.

2. METODE DE AMESTECARE

Fluidele se pot amesteca prin curgere, prin barbotare (pneumatic) și mecanic.

Amestecarea prin curgerea fluidelor se realizează datorită turbulenței fluidelor în curgere, prin conducte în care se pot monta șicane de diverse tipuri, prin folosirea principiului injectorului, prin utilizarea unor pompe care asigură circulația lichidelor printr-un vas de amestecare (fig. I.40, *a*), prin folosirea coloanelor cu umplutură (fig. I.40, *b*) în care circulă în contracurent gaze cu lichide sau lichide de densități diferite.

Amestecarea fluidelor prin barbotare constă în introducerea printr-un lichid a unui agent de barbotare (abur, aer, gaze) sub presiune, folosind țevi găurite așezate aproape de fundul vasului, injectoare sau pompe gaz-lift (fig. I.41).

Aceste amestecătoare au o construcție simplă, cu posibilități de utilizare multiple. Au o eficiență de amestecare mică, consum mare

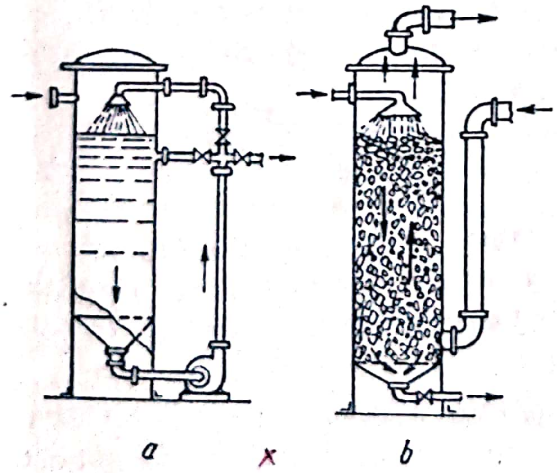

Fig. I.40. Scheme de amestecare prin curgerea fluidelor:
a — folosind o pompă de circulație; *b* — folosind umplutură.

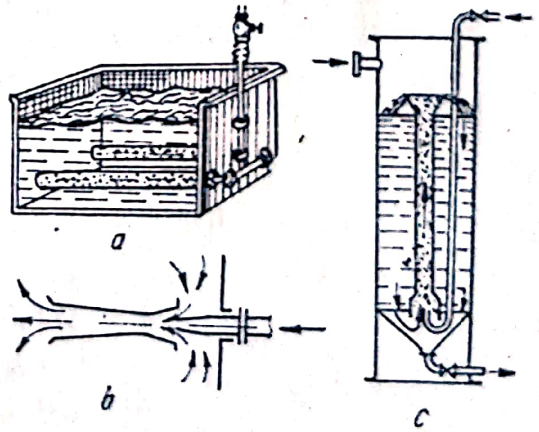

Fig. I.41. Schema de amestecare prin barbotare:
a — țevi găurite la fundul vasului; *b* — injector; *c* — pompă gaz lift.

Scanned with OKEN Scanner

de agent de barbotare și pierderi de lichid prin antrenarea vaporilor.

Amestecarea mecanică a fluidelor este procedeul cel mai des folosit pentru realizarea amestecării lichidelor. Amestecătoarele mecanice sînt formate dintr-un vas de amestecare, dispozitivul de amestecare (agitatorul) și din sistemul de transmitere a mișcării.

3. TIPURI DE AGITATOARE

Constructiv, agitatoarele sînt cu brațe, cu elice și turbine.

Agitatoarele cu brațe sînt cele mai răspîndite. Ele realizează un spectru de curgere predominant tangențial. Tipurile constructive de agitatoare cu brațe sînt:

— *agitatoarele cu palete dreptunghiulare* (fig. I.42, *a*) formate dintr-o placă dreptunghiulară fixată pe axul agitatorului;

— *agitatoarele cu brațe* (fig. I.42, *b*, *c*) formate din una sau mai multe perechi de brațe montate pe axul agitatorului. Pentru intensificarea amestecării, pe pereții vasului se montează șicane orizontale și verticale (fig. I.42, *d*, *e*);

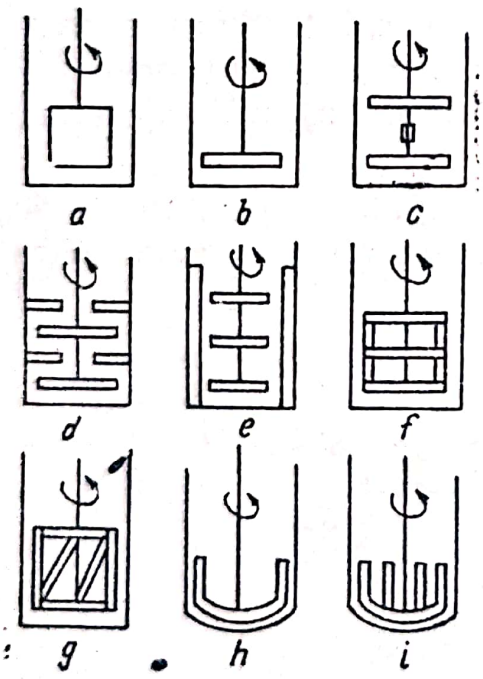

Fig. I.42. Schema agitatoarelor cu brațe:
a — paletă dreptunghiulară; *b* — cu o pereche de brațe; *c* — cu mai multe perechi de brațe; *d* — cu brațe și șicane orizontale; *e* — cu brațe și șicane verticale; *f* — cadru; *g* — cadru cu brațe înclinate; *h* — ancoră cu două brațe; *i* — ancoră cu patru brațe.

— *agitatoarele cu cadru* (fig. I.42, *f*, *g*) formate din brațe orizontale pe care sînt fixate brațe verticale sau oblice;

— *agitatoarele ancoră* (fig. I.42, *h*, *i*) au profilul corespunzător fundului vasului; ele pot fi cu două sau patru brațe și asigură amestecarea în imediata vecinătate a fundului vasului.

Agitatoarele cu brațe se folosesc pentru amestecarea lichidelor cu viscozitate mică (pînă la 1 Pa·s), a lichidelor cu solide de densități apropiate, pentru dizolvări lente. Ele au o construcție simplă și un cost relativ scăzut; lucrează la turații mici (între 20—80 rot/min).

Agitatoarele cu elice produc un spectru de curgere predominant axial. Elicea are două sau trei palete cu suprafață elicoidală și înclinare variabilă.

Agitatoarele cu elice se folosesc pentru vase cu volum relativ mic; la vasele

Scanned with OKEN Scanner

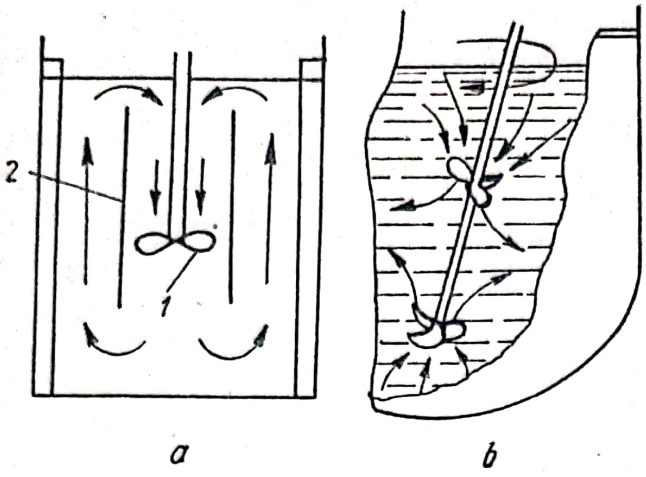

Fig. I.43. Scheme de intensificare a amestecării cu agitatoare elice:
a — cu difuzor cilindric: *1* — elice; *2* — difuzor; *b* — cu două elice.

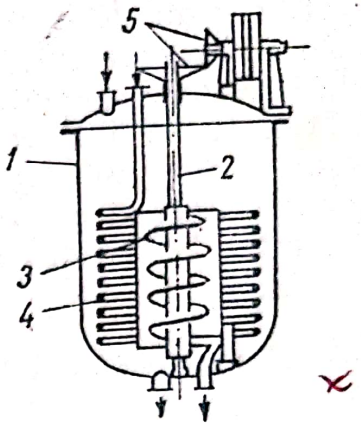

Fig. I.44. Schema agitatorului elicoidal:
1 — vas de agitare; *2* — ax; *3* — șurub; *4* — serpentină; *5* — sistem de transmitere a mișcării.

la care raportul înălțime diametru este mare, pentru intensificarea amestecării se folosesc *difuzoare* (tuburi cilindrice sau tronconice) în interiorul cărora se introduce elicea (fig. I.43, *a*), sau se montează pe același ax două elice care să asigure circulația lichidelor în sensuri opuse (fig. I.42, *b*). Se recomandă ca agitatorul cu elice să se monteze excentric în vas.

Agitatorul elicoidal (șurub, melc) folosește o bandă metalică elicoidală (fig. I.44).

Agitatoarele cu elice funcționează cu turație mare (420—2 400 rot/min), produc o amestecare intensă și rapidă cu consum relativ mic de energie. Ele nu se pot utiliza la amestecarea soluțiilor viscoase (peste 4 Pa·s) sau pentru șarje mari de material și sînt mai scumpe ca agitatoarele cu brațe.

Amestecătoarele cu turbină produc un spectru de curgere predominant radial. Agitatorul este un rotor (turbină) prevăzut cu palete de forme diferite, dispuse radial. Numărul paletelor este cuprins de obicei între 4 și 12; ele pot fi drepte sau curbate.

Turbinele pot fi *tip rotor deschis sau de tip rotor închis*. Rotoarele deschise sînt folosite pentru amestecarea lichidelor de viscozitate mică și medie.

Pentru amestecarea lichidelor cu viscozitate mare se folosesc rotoarele închise cu sau fără stator.

Scanned with OKEN Scanner

Agitatoarele turbină au de obicei turații între 120 și 240 rot/min. Ele sînt greu de realizat, constructiv fiind cele mai scumpe dispozitive de amestecare.

O categorie specială de agitatoare sînt **dispozitivele vibratoare** formate dintr-un disc perforat sau din brațe montate pe un ax acționate de un motor vibrator. Ele prezintă avantajul unui consum redus de energie, fiind utilizate la amestecare sub presiune a unor volume relativ mici de lichid.

4. AMESTECAREA PASTELOR

Pastele sînt materiale cu viscozitate mare (200—10 000 Pa·s) care curg greu. Operația de amestecare a pastelor se numește *malaxare*, iar utilajele folosite se numesc *malaxoare*. Malaxarea presupune întinderea, forfecarea, frecarea pastelor cu scopul de a le omogeniza. Exemple de paste sînt: vopselele, argilele, pastele pentru cauciuc, masele plastice etc.

Malaxoarele cu brațe (fig. I.45) pot fi cu ancoră, cu brațe și șicane, cu brațe în formă de Z sau Σ (rotite de doi arbori paraleli în sensuri inverse).

Holendrul este un utilaj folosit la amestecarea cantităților mari de materiale fibroase (amestecarea pastei de hîrtie).

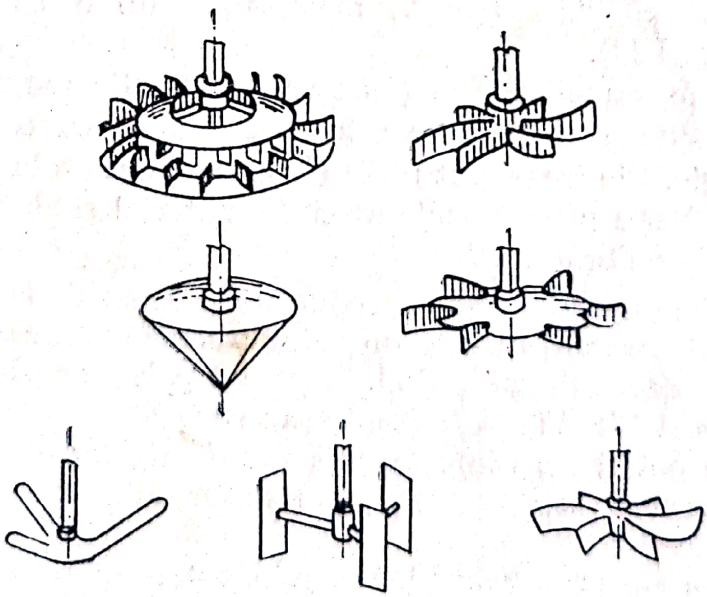

Fig. I.45. Malaxoare (tipuri de brațe).

Scanned with OKEN Scanner

Calandrele se folosesc la omogenizarea materialelor foarte vîscoase: cauciuc și mase plastice. Ele sînt formate din doi sau mai mulți cilindrii încălziți cu abur și fixați pe un postament.

5. NORME DE PROTECȚIA MUNCII, DE PREVENIRE ȘI STINGERE A INCENDIILOR

Amestecătoarele vor fi prevăzute cu capace rezistente, care în timpul funcționării vor fi închise. Amestecătoarele din care se degajă fum, gaze sau vapori, pe lîngă capacele etanșe montate obligatoriu vor fi prevăzute cu dispozitive de absorbție, iar spațiile de amplasare vor fi bine ventilate. Se interzice prelevarea manuală a probelor, precum și deschiderea capacului sau spălarea (curățarea) în timpul funcționării amestecătoarelor.

Organele în mișcare și de transmitere a mișcării vor fi prevăzute cu apărători de protecție corespunzătoare.

Dacă în timpul pornirii sau al funcționării, amestecătorul funcționează anormal (zgomote, bătăi, vibrații), se va opri imediat.

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL II

OPERAȚII TERMICE

Operațiile termice sînt operațiile care au la baza desfășurării lor, legile transferului de căldură. Ele au o importanță deosebită în industria chimică, pentru că nu există ramură a acestei industrii în care să nu fie necesară încălzirea sau răcirea utilajelor, a materiilor prime, sau a produselor finite.

A. TRANSMITEREA CĂLDURII (TRANSFERUL DE CĂLDURĂ)

1. NOȚIUNI GENERALE

Transmiterea căldurii de la un corp la altul, explică realizarea multor operații de natură fizică (încălzirea, răcirea, evaporarea, condensarea etc.) și de natură chimică (reacțiile chimice). Transmiterea căldurii este condiționată de existența unei diferențe de temperatură între cele două corpuri. Căldura trece spontan de la corpul mai cald către corpul mai rece, pînă cînd temperatura celor două corpuri devine egală. În concluzie, forța care face posibil transferul de căldură (forța motrice) este dată de diferența de temperatură (Δt) între cele două corpuri.

Căldura se poate transmite, în funcție de natura celor două corpuri, de temperatura la care se află, de natura spațiului care separă cele două corpuri, prin unul sau mai multe din cele trei moduri posibile: conducție, convecție, radiație.

Prin **conducție,** căldura se transmite din moleculă în moleculă, în interiorul unui corp sau între corpuri care se ating, fără deplasare aparentă de substanță. Moleculele „mai calde", cu mișcări mai intense, se ciocnesc de moleculele „mai reci", cu mișcări mai lente, cedîndu-le o parte din energia lor cinetică, pînă cînd întreaga masă de material are aceeași energie cinetică (aceeași temperatură). Con-

Scanned with OKEN Scanner

ducția este specifică corpurilor solide, dar se întîlnește și la lichide și gaze, însoțind alte moduri de transmitere a căldurii.

Prin **convecție,** căldură se transmite ca efect al deplasării maselor de fluide calde, care poate avea loc în interiorul aceleiași faze sau între faze diferite.

Se numește *convecție naturală (liberă),* cînd deplasarea are loc numai datorită diferențelor de densitate din masa fluidelor (încălzirea aerului din încăperi fără ventilație, încălzirea lichidelor fără agitare etc.).

Se numește *convecție forțată,* cînd deplasarea este accentuată cu mijloace mecanice exterioare (pompe, compresoare, agitatoare etc.).

Prin **radiație,** căldura se transmite ca energie radiantă sub formă de unde electromagnetice, care se transformă parțial în căldură, atunci cînd ele întîlnesc un corp. De exemplu: încălzirea cu radiații solare, încălzirea cu flacără. Radiația este cu atît mai puternică cu cît temperatura corpului este mai ridicată.

2. ECUAȚIILE DE CALCUL ALE TRANSFERULUI TERMIC

Ecuația generală de calcul a transferului termic este:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t, \qquad \text{(II-1)}$$

unde:

Q este cantitatea de căldură transferată în unitatea de timp, în J/s;
K — coeficientul de transfer termic, în $J/m^2 \cdot s \cdot °C$;
A — suprafața pe care se realizează transferul termic, în m^2;
Δt — diferența de temperatură, în °C.

În ecuația generală, mărimile K, A și Δt se calculează diferit, în funcție de caracteristicile transferului de căldură (modul de transfer termic, modul de variație a temperaturii celor două corpuri etc.).

Aplicarea ecuației generale la transferul de căldură prin conducție se face în cazul transmiterii căldurii printr-un perete format dintr-un singur strat cu fețe paralele (fig. II.1), printr-un perete format din mai multe straturi paralele (fig. II.2) și printr-un perete cilindric (fig. II.3).

În cazul *căldurii transmise prin conducție, printr-un perete format dintr-un singur strat cu fețe paralele,* ecuația generală devine:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} A \cdot \Delta t, \qquad \text{(II-2)}$$

Scanned with OKEN Scanner

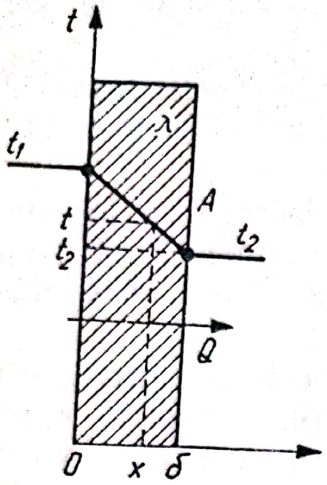

Fig. II.1. Transmiterea căldurii prin conducție printr-un perete cu un singur strat de fețe paralele.

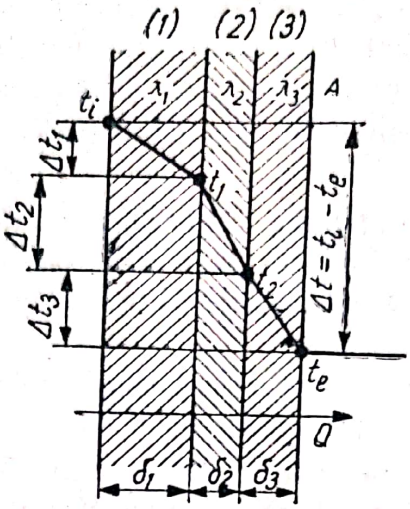

Fig. II.2. Transmiterea căldurii prin conducte prin mai multe straturi paralele.

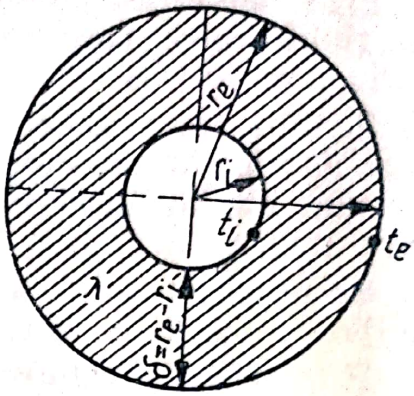

Fig. II.3. Conducție printr-un cilindru cu pereții groși.

unde:

λ este conductivitatea termică, în J/m·s·grad;
δ — grosimea peretelui, în m.

În cazul *transmiterii căldurii prin conducție, printr-un perete format din mai multe straturi paralele,* coeficientul K se calculează:

$$K = \frac{\lambda_1}{\delta^1} + \frac{\lambda_2}{\delta_2} + \frac{\lambda_2}{\delta_3} + \cdots + \frac{\lambda_n}{\delta_1},$$

unde n reprezintă numărul straturilor.

Deci, ecuația (II-1) devine:

$$Q = \left(\frac{\lambda_1}{\delta_1} + \frac{\lambda_2}{\delta_2} + \cdots + \frac{\lambda_n}{\delta_n}\right) A \cdot \Delta t. \qquad \text{(II-3)}$$

În cazul *transmiterii căldurii prin conducție, prin pereți cilindrici groși,* coeficientul K se calculează așa cum s-a arătat mai sus (un strat sau mai multe straturi), la care se adaugă necesitatea medierii suprafeței de transfer termic, deoarece aceasta variază în sensul transferului de căldură.

Astfel, ecuația (II-1) devine:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} A_m \cdot \Delta t = \frac{\lambda}{\delta} 2\pi r_m \cdot \Delta t, \qquad \text{(II-4)}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde:

A_m este aria medie, în m²;

r_m — raza medie (pentru media aritmetică, $r_m = \frac{r_i + r_e}{2}$), în m.

Valoarea conductivității termice este dată în tabela II.1.

Tabela II.1

Constante fizice ale materialelor uzuale

Materialul	Temperatura, t în °C	Densitatea, în kg/m³	Căldura specifică, c în kJ/·grd	Conductivitatea termică, J/m·s·grd
Aer	20	1,2	1,00	0,023
Apă	20	1 000	4,19	0,605
Azbest fibre	20—90	1 930	—	0,81
Azbest carton	50	470	0,817	0,110
Beton uscat	20	2 300	1,13	1,28
Cărămizi de construcții	20	800—1 500	—	0,23—0,29
Cărămizi refractare	500	1 850	—	1,35
Lemn	20	800	—	0,207
Plută	30	190	1,88	0,042
Porțelan	95	2 400	1,09	1,04
Sticlă	20	2 500	0,67	0,75
Vată de sticlă	0	200	—	0,37
Zidărie uscată	20	—	0,67	0,41
Fontă	20	7 200	0,50	63
Oțel	20	7 900	0,46	45
Aluminiu	20	2 600	0,97	203
Argint	0	10 500	2,39	458
Plumb	0	11 400	0,129	35

Aplicarea ecuației generale la transferul de căldură prin convecție se face în cazul transmiterii căldurii printr-un perete despărțitor (fig. II.4). În această situație, convecția se combină cu conducția, ecuația generală (II-1) devine:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot A \cdot \Delta t, \qquad \text{(II-5)}$$

unde:

$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = K$, este coeficientul total de transfer termic în J/m²·s·grd;

Scanned with OKEN Scanner

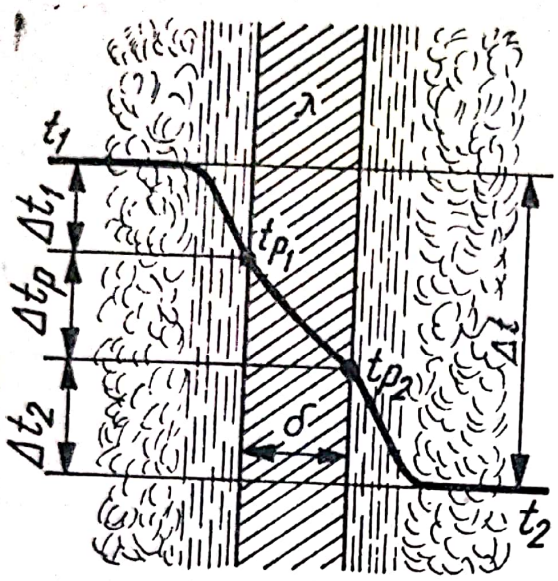

Fig. II.4. Transmiterea căldurii de la un fluid cald la unul rece.

α_1 — coeficientul parțial de transfer termic de la fluidul cald la perete, în J/m²·s·grd;

δ — grosimea peretelui despărțitor, în m;

λ — conductivitatea termică a materialului peretelui despărțitor, în J/m·s·grd;

α_2 — coeficientul parțial de transfer termic de la peretele cald la fluidul rece, în J/m²·s·grd.

Coeficienții parțiali de transfer termic α depind de natura fluidului exprimată prin constantele fizice, viteza fluidului etc.

În tabela II-2 se dau valorile aproximative ale coeficienților α pentru principalele fluide.

Tabela II.2

Valori ale coeficientului α

Fluidul	α, în J/m²·s·grd		
	Valori minime	Valori medii	Valori maxime
Aer, gaze de ardere	7—9	17—50	70—90
Țiței, uleiuri, produse petroliere	50—70	120—230	350—700
Apă	5 800—7 000	930—2 900	4 600—12 000
Abur	230—700	9 300—18 600	21 000—29 000

Pentru calculul cantității de căldură transferată prin radiație între cele două corpuri solide, se folosește ecuația:

$$Q = \Sigma\sigma_n \cdot A\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \qquad \text{(II-6)}$$

unde:

Σ este coeficientul de emisie a corpurilor, cu valori cuprinse între 0 și 1;

Scanned with OKEN Scanner

σ_n — constanta de emisie a corpului negru absolut, care are valoarea 5,72 J/m²·s·K⁴;
A — suprafața celor două corpuri, în m²;
T_1 — temperatura corpului cald, în K;
T_2 — temperatura corpului rece, în K.

Pentru calculul căldurii radiate de lichide și gaze, relațiile se complică deoarece acesta nu absorb toate lungimile de undă ale radiației calorice.

3. DIFERENȚA MEDIE DE TEMPERATURĂ

În toate ecuațiile, pentru calculul transmiterii căldurii se consideră că temperaturile pe fețele pereților, respectiv temperaturile fluidelor, sînt constante și ca atare, diferența totală de temperatură este de asemenea constantă. În realitate, acest caz se întîlnește foarte rar, deoarece variația temperaturilor rezultă din însuși schimbul de căldură dintre cele două fluide: fluidul cald cedează căldura și deci se răcește, temperatura lui scade, iar fluidul rece primește căldură, se încălzește, deci temperatura lui crește. În figura II.5, *a* este reprezentată variația temperaturii fluidelor, precum și a diferențelor de temperatură dintre acestea, în lungul schimbătoarelor de căldură, în care circulația fluidelor se face în *curent paralel*, iar în figura II.5, *b*, pentru circulația fluidelor în *contracurent*. Considerînd că transferul de căldură decurge în regim staționar, relația (II-1) devine:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m = K \cdot A \cdot \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{ln \dfrac{\Delta t''}{\Delta t'}}, \qquad \text{(II-6)}$$

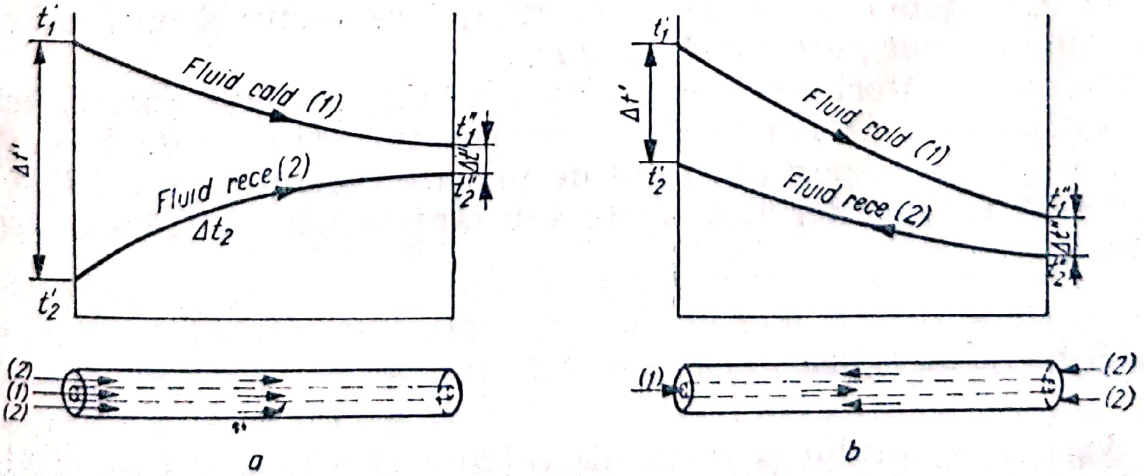

Fig. II.5. Variația temperaturilor în lungul schimbătoarelor de căldură:
a — în curent paralel; *b* — în contracurent.

Scanned with OKEN Scanner

în care, Δt_m reprezintă media logaritmică a diferențelor de temperatură la cele două capete ale schimbătorului.

4. IZOLAREA TERMICĂ

Pentru a micșora pierderile de căldură, utilajele în care au loc operațiile termice se izolează prin acoperirea suprafețelor cu un strat de izolație termică format din materiale cu conductivitate termică foarte mică. Stratul de izolație termică mărește rezistența termică a peretelui, micșorînd, astfel, temperatura suprafeței sale exterioare.

Ca materiale izolante se utilizează sub diferite forme, funcție de temperatură: plută (expandată sau rumeguș), kieselgur, magnezie, vată de lemn, ciment poros, azbest, vată de sticlă, vată minerală, fibre textile, polistiren expandat sau extrudat, poliuretan etc. Materialele izolante se folosesc fie sub formă de pastă, care se întărește prin uscare, fie sub formă de material ca atare, fixat pe suprafața de izolat.

Pentru reducerea pierderilor de căldură prin radiație, se recurge la vopsirea suprafețelor cu vopsele din materiale cu coeficienți de emisie mici (bronz de aluminiu), sau chiar argintarea acestor suprafețe.

B. ÎNCĂLZIREA ȘI RĂCIREA APARATELOR DIN INDUSTRIA CHIMICĂ

Încălzirea sau răcirea utilajelor presupune schimbul de căldură între substanțele care se găsesc în utilajul respectiv și un fluid exterior, numit *agent purtător de căldură*.

Agenții purtători de căldură sînt substanțe gazoase, vapori, lichide sau solide, care preiau energia termică din exterior de la o sursă oarecare și o transportă la locul de folosire (agenți de încălzire), sau evacuează energia termică de la substanțele care se răcesc (agenți de răcire).

1. METODE DE INCĂLZIRE

Alegerea agentului purtător de căldură și a modului de realizare a schimbului termic depinde de: condițiile în care se desfășoară operațiile care necesită introducerea sau evacuarea de căldură, tempe-

Scanned with OKEN Scanner

ratură, suprafață de încălzire disponibilă, presiune, solicitare termică etc.

Încălzirea cu gaze. Gazele sînt purtători de căldură slabi, deoarece au căldură specifică mică și coeficienți parțiali de transmitere a căldurii mici. Se utilizează, mai ales, gaze de ardere obținute prin arderea combustibililor, care permit încălzirea de la 400°C pînă la 700°C și chiar pînă la 1 000°C. Gazele de ardere se utilizează la încălzirea cuptoarelor cu vatră, cuptoarelor rotative, uscătoarelor, cuptoarelor pentru topituri alcaline etc.

Dezavantajele încălzirii cu gaze sînt următoarele: încălzire neuniformă, posibilitatea unor supraîncălziri locale, reglare dificilă a încălzirii, uzură accentuată a materialelor de construcție în zonele care vin în contact cu agentul de încălzire.

Încălzirea cu vapori. Se folosesc mai ales vaporii de apă pînă la temperaturi de 200—250°C, cînd presiunea lor atinge valori cuprinse între 16 și 40 at. Pentru temperaturi mai mari se utilizează vapori de lichide mai greu volatile, cum ar fi: difenilul și difenil-eterul, sau un amestec al acestora, pînă la temperaturi de 370°C, presiunea fiind doar de 6 at. Pentru încălziri la temperaturi mai mari (400—500°C) se folosesc vapori de mercur, dar utilizarea lor este limitată de toxicitatea acestora și de costul ridicat.

Vaporii de apă prezintă următoarele calități deosebite: coeficient de transfer termic foarte mare, căldură mare de condensare, posibilitatea de a fi transportați prin conducte la distanțe mari, încălzire uniformă, deoarece condensarea are loc la temperatură constantă, reglare ușoară a operațiilor de încălzire, cost redus, nu sînt inflamabili și nici toxici.

Cel mai răspîndit mod de încălzire cu vapori de apă este încălzirea indirectă, prin intermediul unui perete despărțitor. Acest mod de încălzire se poate realiza prin serpentine interioare, prin manta (fig. II.6), prin serpentine exterioare și prin schimbătoare de căldură. Pentru a intensifica schimbul de căldură se pot combina aceste variante, mărindu-se suprafața de contact între fluidele participante la schimbul de căldură.

La încălzirea cu vapori, o problemă deosebit de importantă o constituie evacuarea condensatului pe măsură ce se formează, pentru a nu îneca suprafața prin care are loc transmiterea căldurii, precum și pentru a nu evacua vapori necondensați. Pentru aceasta se utilizează în general, oalele de condens (v. fig. II.6) montate la 0,5 m sub nivelul aparatului supus încălzirii.

Încălzirea cu lichide. Lichidele se utilizează sub formă de băi (în laboratoare), sau în circuit închis între aparatul supus încălzirii și

Scanned with OKEN Scanner

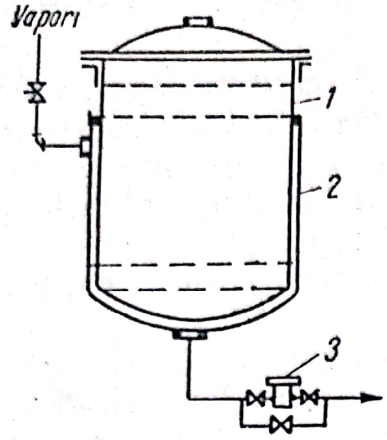

Fig. II.6. Încălzirea cu vapori de apă prin manta:

1 — corpul recipientului de încălzit; *2* — manta; *3* — oală de condens.

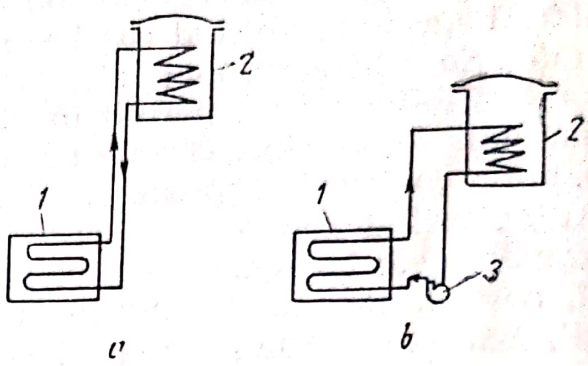

Fig. II.7. Schema circulației purtătorilor de căldură lichizi:

a — circulație naturală; *b* — circulație forțată; *1* — generator de căldură; *2* — aparat de încălzire; *3* — pompă.

sursa de căldură (fig. II.7), variantă folosită frecvent în industrie. Circulația purtătorului de căldură lichid se poate realiza fie datorită diferenței de densitate între lichidul fierbinte și cel care iese din aparat, numită *circulație naturală* (fig. II.7, *a*), fie cu ajutorul unei pompe de recirculație, numită *circulație forțată* (fig. II.7, *b*).

Drept lichide de încălzire se folosesc următoarele:

— apa, la care temperatura maximă (200°C) este limitată de valori foarte ridicate ale presiunii;

— uleiurile minerale, la care temperatura maximă este limitată de descompunerea termică a acestora (300°C);

— lichide organice, cu punct ridicat de fierbere (difenil, difenil-eter, amestec eutectic difenil-difenil-eter, glicerină, naftalină siliconi), care se folosesc pînă la temperaturi de 400°C;

— săruri minerale topite (azotați și azotiți) pentru temperaturi de 400—550°C;

— metale topite (mai rar) pînă la temperaturi de 1 000°C.

Încălzirea cu materiale solide. Ca și purtătorii de căldură lichizi, agenții termici solizi se pot utiliza atît sub formă de băi, cît și în circuit închis. În procedeul de încălzire numit *termofor*, bilele sînt încălzite direct într-un generator de căldură, prin arderea unui gaz combustibil, de unde trec, prin cădere liberă, în aparatul de încălzit (de obicei un reactor chimic); după ce cedează căldura în reactor, bilele sînt readuse în generatorul de căldură.

Scanned with OKEN Scanner

Se folosește tot mai frecvent încălzirea cu materiale granulare pulverulente, care circulă asemănător cu fluidele, prin aducerea lor în stare de fluidizare.

Încălzirea solară este o metodă care valorifică o parte din imensa radiație solară ajunsă pe suprafața pămîntului. Se bazează pe principiul concentrării (focalizării) radiațiilor solare, cu ajutorul unor sisteme de oglinzi, asupra unor fluide (în general, apa) care transformă energia radiantă în energie calorică. Aceste fluide încălzite servesc, apoi, drept agenți de încălzire.

Încălzirea electrică este o metodă de încălzire fără purtător de căldură material. Transformarea energiei electrice în căldură se realizează prin trecerea curentului electric prin rezistențe electrice, transformarea energiei electrice în radiații infraroșii, încălzirea prin arc electric.

Încălzirea electrică are unele avantaje (reglare rapidă, posibilitatea încălzirii directe, posibilitatea încălzirii în vid sau la presiuni mari etc.), dar costul ridicat al energiei electrice limitează utilizarea ei.

2. METODE DE RĂCIRE

Pentru răciri la temperaturi obișnuite se utilizează ca agenți purtători de căldură:

— *Apa* provenită din puțuri (temperatură 15°C) sau apa de recirculație, răcită în turnurile de răcire (temperatura 25—30°C). La răcirea cu apă, temperatura finală a acesteia nu trebuie să depășească 50—60°C, deoarece peste această temperatură au loc depuneri de săruri (cruste) pe suprafața prin care are loc transferul termic.

— *Aerul*, care se folosește din ce în ce mai frecvent, realizează răcirea de obicei în convecție forțată, cu ajutorul unor ventilatoare puternice care suflă aerul peste schimbătoarele de căldură special construite (cu aripioare), în vederea măririi atît a suprafeței de contact, cît și a coeficientului de transfer termic.

— *Solele*, pentru răciri la temperaturi sub 0°C (pînă la —50°C), care sînt soluții ale unor substanțe anorganice și organice. Astfel, amestecul de sare de bucătărie cu gheață (conținînd pînă la 20% NaCl) realizează răcirea pînă la —20°C, iar amestecul de clorură de calciu cu gheață (30% $CaCl_2$) realizează răcirea pînă la —50°C. Se mai folosesc soluții de etilen-glicol.

Scanned with OKEN Scanner

3. SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ

Prin schimbătoare de căldură se înțeleg, în general, aparatele termice folosite în industria chimică pentru transferul de căldură între două fluide, prin intermediul unui perete despărțitor.

În industria chimică și în rafinării, schimbătoarele de căldură se utilizează pe scară largă, atît ca utilaje independente, cît și ca părți ale altor aparate și instalații, deoarece majoritatea proceselor tehnologice sînt însoțite de degajare sau absorbție de căldură.

Schimbătoarele de căldură se clasifică după mai multe criterii:

— *După scopul urmărit,* ele sînt: schimbătoare de căldură propriu-zise (încălzitoare și răcitoare), radiatoare, cazane de abur, evaporatoare, condensatoare.

— *După configurația suprafețelor de transfer de căldură,* ele sînt: cu serpentină, tubulare (coaxiale și cu fascicul de țevi), din tablă (spirale, cu plăci, cu manta), cu țevi cu aripioare.

— *După modul de prelucrare a dilatațiilor termice,* ele sînt: de construcție rigidă, cu compensator în manta, cu cap mobil, cu fascicul de țevi în U.

— *După numărul trecerilor fluidelor prin spațiile de circulație,* ele pot fi cu o trecere și cu mai multe treceri.

— *După materialul de construcție,* ele sînt metalice, nemetalice și combinate.

Schimbătoare de căldură cu serpentină. Sînt construite cu una sau mai multe serpentine, fixate în exteriorul vasului sau, mai frecvent, în interiorul vasului; se folosesc pentru încălzirea sau răcirea reactoarelor chimice, drept condensatoare etc.

În figura II.8 este schițat un schimbător de căldură cu serpentină interioară. Prin serpentină circulă, în general, fluidul cald. Aceste schimbătoare de căldură nu pot fi folosite pentru fluide care depun cruste, greu de curățat în interiorul serpentinelor.

Schimbătoare de căldură cu țevi coaxiale (fig. II.9). Sînt constituite din mai multe elemente, formate din două țevi coaxiale asamblate prin intermediul unor coturi, pentru legarea conductelor interioare și prin punți din racorduri cu flanșă, pentru legarea țevilor exterioare; se mai numesc și schimbătoare de căldură „țeavă în țeavă". Țevile exterioare sînt îmbinate cu țevile interioare prin sudură și uneori prin filet. Datorită secțiunilor mici ale celor două țevi se realizează viteze mari de circulație a fluidelor, ceea ce asigură coeficienți de transfer termic mari. Construcția lor permite folosirea lor la presiuni ridicate. Prezintă dezavantajul unui consum mare de material de construcție și al unei compactități reduse.

Scanned with OKEN Scanner

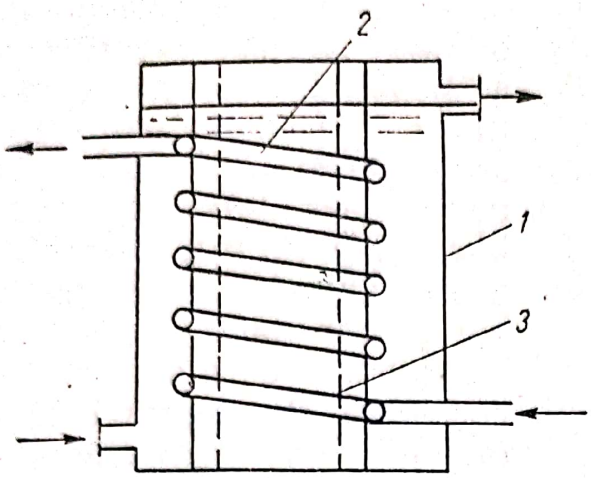

Fig. II.8. Schimbător de căldură cu serpentină interioară afundată:
1 — vas; *2* — serpentină; *3* — sistemul de prindere al serpentinei.

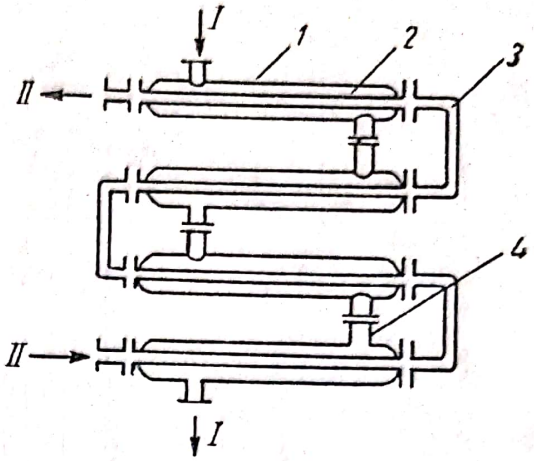

Fig. II.9. Schimbător de căldură cu țevi coaxiale:
1 — țeavă exterioară; *2* — țeavă interioară; *3* — coturi; *4* — punți de legătură.

Schimbătoare de căldură cu fascicul de țevi. Sînt cele mai răspîndite în industria chimică. Aceste schimbătoare de căldură, în forma lor cea mai simplă (fig. II.10, *a*) sînt formate dintr-un fascicul de țevi ale căror capete sînt fixate prin mandrinare, lipire, sudare sau cu presetupă, în găurile a două plăci speciale, numite plăci tubulare *2*; fasciculul de țevi este introdus într-o mantă fixată etanș de plăcile tubulare, prevăzută cu două capace, care delimitează camerele necesare distribuției și colectării fluidului care circulă prin țevi. Pentru intrarea și ieșirea fluidelor sînt prevăzute patru ștuțuri, două la manta și cîte unul la fiecare capac. În această construcție, unul dintre fluide circulă prin țevi (intratubular), iar celălalt fluid circulă prin spațiul dintre țevi (intertubular). Această construcție asigură circulația unor cantități mari de fluide, suprafețe mari de contact între ele, compactitate ridicată.

Perfecționările și îmbunătățirile constructive aduse schimbătoarelor de căldură tubulare au următoarele scopuri principale:

— Intensificarea schimbului de căldură prin mărirea vitezei de circulație a fluidelor.

În figura II.10, *b* este reprezentat un schimbător de căldură cu patru treceri prin țevi, realizate cu ajutorul pereților despărțitori și cu două treceri prin spațiul dintre țevi, realizate cu ajutorul unei șicane longitudinale. Pentru intensificarea circulației fluidului dintre țevi se pot monta și șicane orizontale. Aceste efecte sînt vizibile și în construcțiile schițate în figura II.11, *a* și *b*.

Scanned with OKEN Scanner

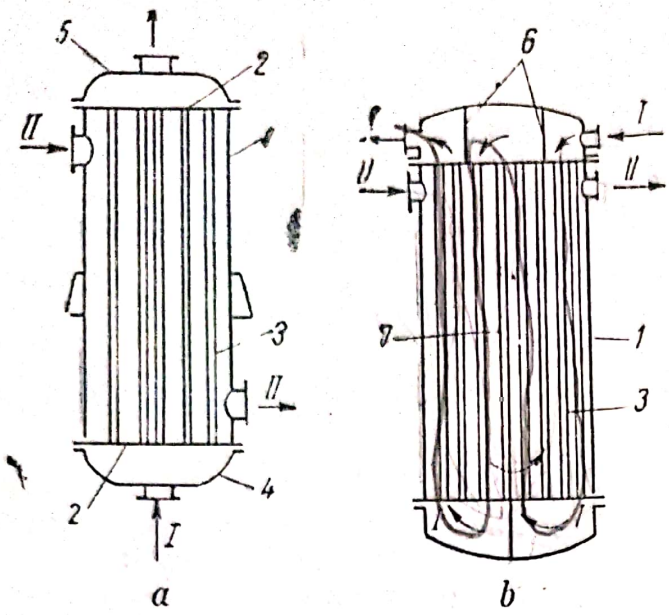

Fig. II.10. Schimbătoare de căldură tubulare:

a — schimbător cu o singură trecere prin țevi; *b* — cu mai multe treceri; *1* — manta; *2* — placă tubulară; *3* — țevi; *4, 5* — capace; *6* — pereți despărțitori; *7* — șicană longitudinală.

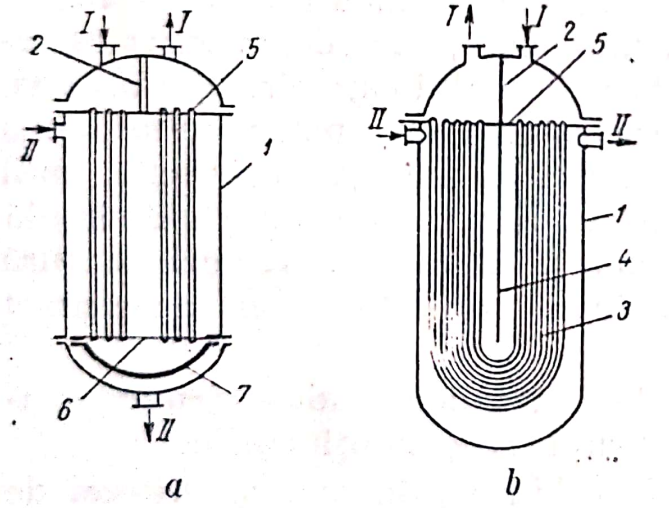

Fig. II.11. Construcții de schimbătoare de căldură tubulare pentru compensarea sau înlăturarea eforturilor de dilatare:

a — cu cap flotant inferior; *b* — cu țevi în formă de U; *1* — monta; *2* — pereți despărțitori; *3* — țevi în formă de U; *4* — șicană longitudinală; *5* — placă tubulară; *6* — placă tubulară a capului flotant; *7* — cap flotant.

— Evitarea eforturilor de dilatare neegală a țevilor și a mantalei. Construcția din figura II.11, *a* realizează acest scop prin montarea unei plăci tubulare lăsată liber (cap flotant) permițînd astfel alungiri și contracții ale țevilor fără să afecteze mantaua. Se mai folosesc variantele din figura II.11, *b* (alungirile și cotracțiile sînt preluate de curbura țevilor în formă de U) sau construirea unei lire de dilatare în manta, care permite alungirea și contracția acesteia odată cu țevile.

— Ușurarrea curățirii de crustă depusă în spațiul dintre țevi. La variantele constructive din figura II.11, *a*, fasciculul de țevi se poate demonta și scoate din manta pentru reparații sau curățirea suprafeței exterioare a țevilor. Acest avantaj îl prezintă și varianta cu țevi în formă de U (fig. II.11, *b*), dar la acesta, curățirea interioară a țevilor este dificilă din cauza curburii acestora.

În schimbătoarele de căldură tubulare, țevile sînt repartizate cît mai uniform pe întreaga secțiune transversală. În plăcile tubulare, țevile sînt dispuse în hexagoane (fig. II.12, *a*), în cercuri concentrice (fig. II.12, *b*) sau în pătrat.

În ceea ce privește circulația fluidelor în schimbă-

Scanned with OKEN Scanner

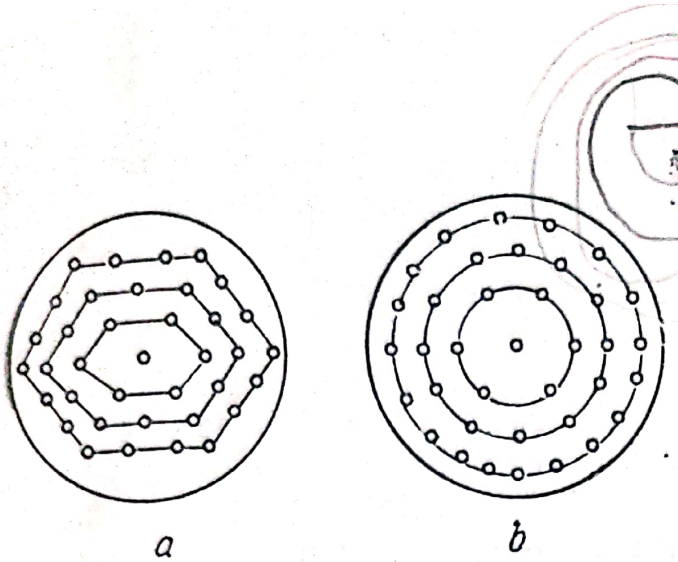

Fig. II.12. Dispunerea țevilor în schimbătoarele de căldură tubulare:
a — în hexagon; *b* — în cercuri concentrice.

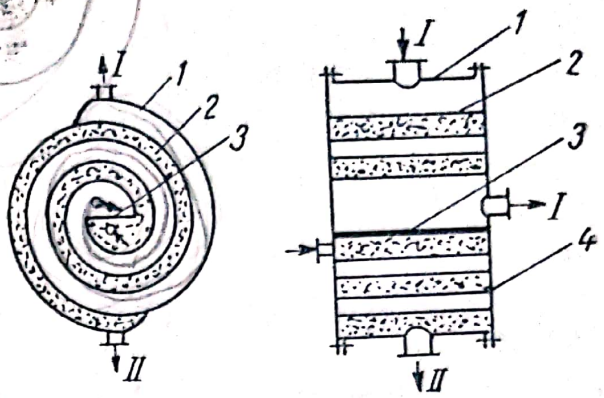

Fig. II.13. Schimbător de căldură spiral:
1, 2 — table spirale; *3* — perete despărțitor; *4* — pereți laterali.

toarele de căldură tubulare, de regulă, prin țevi circulă fluidul mai cald, cu debit mai mic, printre țevi circulă fluidele cu debit și viscozitate mai mare.

Schimbătoarele de căldură cu manta (v. fig. II.6) se folosesc pentru încălzirea sau răcirea fluidelor prin pereții vaselor în care se află (reactoare, amestecătoare etc.). Pentru a asigura un schimb de căldură mai intens se folosesc sisteme de agitare a fluidelor, cînd se intensifică convecția în masa fluidelor din vas.

Schimbătoare de căldură spirală (fig. II. 13). Spațiile prin care circulă cele două fluide reprezintă două canale în spirală, de formă dreptunghiulară. Canalele sînt delimitate în lungul lor de două table subțiri îndoite în formă de spirală, iar lateral, de doi pereți plani; tablele care formează și delimitează cele două spații spirale au și rolul de suprafață de schimb termic. Capetele interioare ale celor două table sînt unite cu un perete despărțitor, care asigură delimitarea inițială a celor două spații. Fiecare spațiu este prevăzut cu două racorduri pentru intrarea și ieșirea fluidelor.

La aceste schimbătoare, ambele fluide au viteze mari, coeficienți parțiali de transfer termic de cîteva ori mai mari decît la schimbătoarele tubulare, compactitate mare, posibilitatea realizării schimbului de căldură la diferențe de temperatură mici.

Dezavantajele acestor schimbătoare de căldură se datoresc dificultăților de etanșare laterală, complexității construcției, limitării folosirii la presiuni mici (pînă la 6—10 at).

Schimbătoare de căldură cu plăci (fig. II.14). Spațiile prin care circulă fluidele sînt delimitate de niște plăci subțiri plane sau profilate, dispuse astfel încît să asigure o concentrare cît mai mare a

Scanned with OKEN Scanner

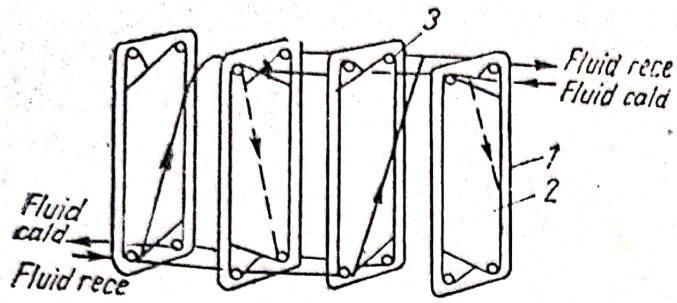

Fig. II.14. Schimbător de căldură cu plăci: 1 — placă plană; 2 — garnituri; 3 — orificii.

suprafeței de încălzire și o circulație a fluidelor care să favorizeze schimbul de căldură la diferențe mici de temperatură. Fiecare placă are cîte patru orificii 3, care prin asamblarea plăcilor constituie canalele pentru circulația fluidelor; dispunerea garniturilor asigură repartizarea și circulația fluidelor prin spațiile delimitate de două plăci consecutiv. În acest mod se poate realiza circulația în contracurent a fluidelor pentru fiecare placă în parte.

Schimbătoare de căldură cu aripioare. Construcția acestor schimbătoare de căldură a rezultat din necesitatea de a mări suprafața de transfer de partea fluidului cu coeficient de transfer termic mic (gaze). Această mărire a suprafeței se realizează prin montarea unor aripioare transversale sau longitudinale (fig. II.15). Gazele circulă întotdeauna în exteriorul țevilor, perpendicular pe acestea. Efectul de mărire a suprafeței cu ajutorul aripioarelor este cu atît mai mare, cu cît este mai ridicată viteza de circulație a fluidului.

Aceste schimbătoare de căldură au o răspîndire din ce în ce mai mare, datorită tendinței tot mai pronunțate de utilizare a aerului ca agent purtător de căldură.

Pe suprafețele de transfer ale schimbătoarelor de căldură se depun impurități care formează cruste.

Procedeele de curățire a crustei sînt:

— spălarea cu apă sau abur cu viteză mare (curățire hidraulică);

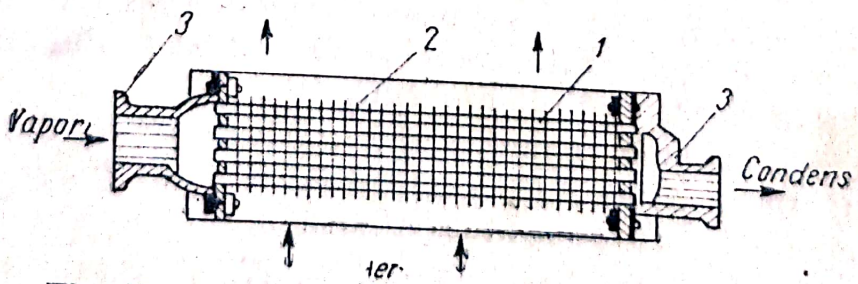

Fig. II.15. Schimbător de căldură cu aripioare: 1 — fascicul tubular; 2 — aripioare transversale; 3 — capace.

— curățirea mecanică cu ajutorul unor scule acționate manual sau mecanic (răzuitoare, burghie);

— curățirea chimică cu soluții care dizolvă materialele depuse, sau numai ajută la desprinderea lor.

Aplicații

1. Să se calculeze ce cantitate de căldură se transmite (se pierde) prin peretele unei încăperi, cunoscînd că peretele este construit din cărămidă de construcții, că temperatura pe fața interioară a peretelui $t_1=20°C$, iar temperatura pe fața exterioară a peretelui $t_2=10°C$, peretele avînd lungimea $L=20$ m, înălțimea $h=5$ m și grosimea $\delta=50$ cm.

Rezolvare:

Se folosește relația:

$$Q=\frac{\lambda}{\delta} A \cdot \Delta t.$$

$$A=L \cdot h=20 \cdot 5=100 \text{ m}^2;$$

$$\Delta t=t_1-t_2=20-10=10°C.$$

Din tabela II.1 se ia valoarea lui $\lambda=0{,}25$ J/m·s·grd pentru cărămidă de construcție.

Se obține:

$$Q=\frac{0{,}25}{0{,}50} 100 \cdot 10=500 \text{ J/s}.$$

2. Să se explice ce operație este necesară pentru a menține temperatura peretelui din exemplul 1, la valoarea constantă de 20°C.

3. Să se calculeze și să se explice problema 1, în cazul în care peste peretele de cărămidă se aplică un strat de plută de, grosime $\delta=10$ cm.

4. Să se calculeze ce suprafață de transfer termic trebuie să aibă schimbătorul de căldură care asigură operația de răcire a 1 000 kg apă/h, de la temperatura $t_1'=80°C$ la temperatura $t_1''=40°C$, folosind apa de răcire cu $t_2''=20°C$ și $t_2'=40°C$.

Scanned with OKEN Scanner

Rezolvare:

Pentru a calcula cantitatea de căldură care se transferă între cele două fluide, se aplică relația de bilanț termic: $Q_c = Q_p$, unde:

Q_c este cantitatea de căldură cedată de apa caldă, în J/h;
Q_p — cantitatea de căldură primită de apa rece, în J/h.

$$Q_c = G(h_1 - h_2)$$

Valorile entalfiilor specifice ale apei de 80°C, respectiv 40°C sînt: $33{,}44 \cdot 10^4$ J/kg și $16{,}72 \cdot 10^4$ J/kg.
Deci:

$$Q_c = 1\,000(33{,}44 \cdot 10^4 - 16{,}72 \cdot 10^4) = 1{,}672 \cdot 10^8 \text{ J/h}.$$

Suprafața necesară schimbătorului de căldură se calculează cu relația:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} A \cdot \Delta t_m,$$

valabilă pentru transferul termic prin convecție și conducție de la un fluid cald la unul rece, printr-un perete despărțitor, unde:

$$Q = Q_c = 1{,}672 \cdot 10^8 \text{ J/h} = 4{,}65 \cdot 10^4 \text{ J/s}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{2{,}3 \lg \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{40 - 20}{2{,}3 \lg \frac{40}{20}} = 29°\text{C}$$

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 80 - 40 = 40°\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 40 - 20 = 20°\text{C},$$

pentru circulația în contracurent, care trebuie aplicată în situația din problemă.

$\alpha_1 = 1\,000$ J/m·s·grd și $\alpha_2 = 500$ J/m·s·grd;
δ = grosimea peretelui despărțitor se ia 2 mm;
$\lambda = 45$ J/m·s·grd, pentru oțel (din tabela II.1).

Coeficientul total de transfer termic este:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = 333 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{grd}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Din relația:

$$Q = K \cdot A \cdot Q \Delta t_m,$$

se calculează aria:

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_m} = 4{,}65 \text{ m}^2$$

5. Să se calculeze ce suprafață de transfer termic are schimbătorul de căldură folosit în cazul situației din exemplul 4, dacă se produce o pierdere de căldură în exterior de 200 j/s (în exemplul 4 s-au neglijat pierderile). Să se compare cele două situații.

C. EVAPORAREA

1. NOȚIUNI GENERALE

Din punct de vedere fizic, *evaporarea (vaporizarea) este transformarea unei substanțe din stare lichidă în stare de vapori.* Ca operație unitară, evaporarea se utilizează în industria chimică pentru concentrarea unor soluții, prin îndepărtarea sub formă de vapori, a unei părți din solvent.

Operația constă în transformarea în vapori a dizolvantului volatil, urmată de îndepărtarea acestora din aparatul în care are loc operația. Astfel, conținutul dizolvantului în soluție scade, iar concentrația soluției în substanță nevolatilă (dizolvat) crește. Transformarea dizolvantului în vapori se face prin fierbere sau prin vaporizare. Evaporarea se referă numai la transformarea dizolvantului în vapori prin fierbere.

Căldura necesară evaporării poate fi furnizată de purtători de căldură gazoși, lichizi sau vapori, prin încălzire directă sau indirectă. Cel mai răspîndit mod de transmitere a căldurii în evaporatoare este încălzirea indirectă cu vapori de apă (abur).

În industria chimică, operația de evaporare se realizează prin trei procedee importante: evaporarea simplă, evaporarea cu efect multiplu și, mai rar, evaporarea cu pompă de căldură.

Alegerea procedeului de evaporare cel mai potrivit, a tipului de evaporator cel mai eficient, necesită cunoașterea tuturor factorilor care influențează operația de evaporare. Dintre acestea se amintesc:

— *Temperatura de fierbere a soluției.* Cu cît aceasta este mai mare, cu atît evaporarea decurge în condiții mai grele (temperatură

Scanned with OKEN Scanner

ridicată a agentului de încălzire, încărcare termică ridicată). Creșterea temperaturii de fierbere a soluției se datorește concentrației substanței nevolatile dizolvate, presiunii hidrostatice din evaporator și rezistenței hidraulice opusă la trecerea vaporilor secundari.

— *Sensibilitatea termică.* Unele substanțe (în special organice), au o rezistență scăzută la temperaturi ridicate (se descompun termic). Rezultă deci, că pentru aceste substanțe este necesar ca evaporarea să se efectueze la temperaturi cît mai joase, în timp cît mai scurt.

— *Concentrația soluției.* Creșterea concentrației soluțiilor în evaporatoare influențează nefavorabil operația de evaporare, prin înrăutățirea transmiterii de căldură, prin reducerea circulației soluției și prin depunerea de cruste.

2. PROCEDEE DE EVAPORARE

Evaporarea simplă (fig. II.16) constă în fierberea soluției diluate pînă la atingerea concentrației cerute, într-un singur evaporator. Vaporii rezultați din fierbere, numiți vapori secundari (w_1) sînt eliminați în atmosferă (mai rar), sau sînt conduși într-un condensator (pentru recuperarea lor și a căldurii conținute). Evaporatorul este încălzit, de obicei, cu abur. Evaporarea simplă se realizează continuu sau discontinuu, la presiune atmosferică sau în vid (pentru micșorarea punctului de fierbere, încălzire mai puternică).

Evaporarea cu efect multiplu (multiplă) urmărește realizarea economiei de abur primar pentru încălzire și de apă de răcire pentru condensare, prin utilizarea vaporilor secundari dintr-un evaporator, ca abur de încălzire în evaporatorrul imediat următor al unei instalații de evaporare formată din mai multe evaporatoare.

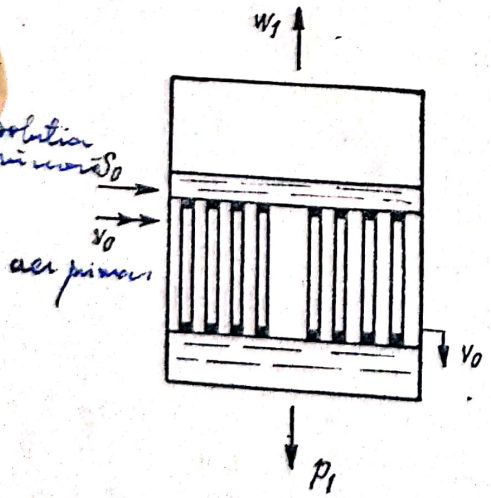

Fig. II.16. Schiță de principiu pentru evaporarea simplă.

Pentru ca vaporii secundari dintr-un evaporator să fie folosiți ca abur de încălzire în evaporatorul imediat următor este necesar ca temperatura de fierbere a soluției din acesta să fie mai mică decît cea din evaporatorul precedent. Rezultă că, într-o instalație de evaporare multiplă, temperaturile și presiunile sînt diferite, scăzînd de la primul către ultimul evaporator.

După modul de circulație a soluției supuse concentrării și a agentului de încălzire,

Scanned with OKEN Scanner

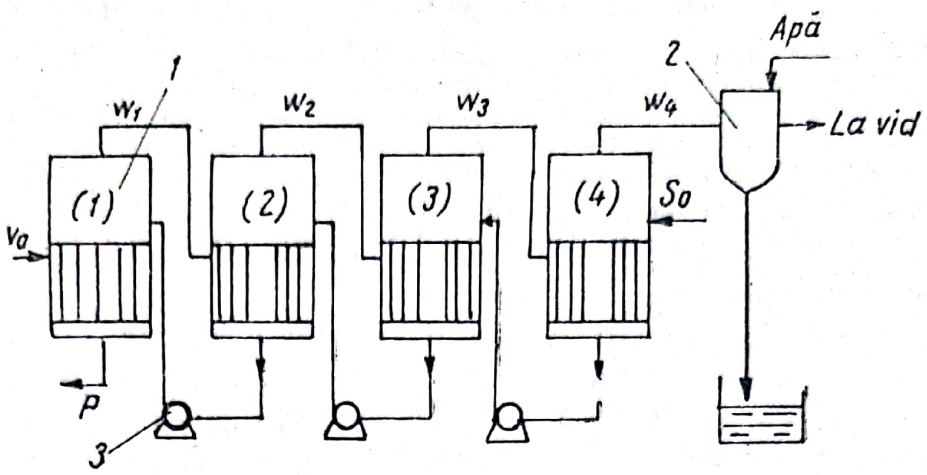

Fig. II.17. Circulația soluției în contracurent într-o instalație de evaporare cu efect multiplu:
1 — evaporatoare; *2* — condensator barometric; *3* — pompe.

instalațiile de evaporare multiplă se împart în două categorii: cu circulație în curent paralel și în contracurent.

În figura II.17 este arătată schema unei instalații de evaporare multiplă cu circulație în contracurent, folosită mai frecvent în industrie pentru avantajele sale față de instalațiile cu circulație în curent paralel.

Numărul evaporatoarelor dintr-o instalație cu efect multiplu este cuprins între 3 și 5.

Evaporarea cu pompă de căldură, utilizează în calitate de vapori primari, vaporii secundari rezultați în același evaporator, după ce li se ridică presiunea și temperatura de condensare prin comprimare.

3. TIPURI DE EVAPORATOARE

Evaporatoarele sînt utilajele în care se realizează evaporarea unui lichid, în vederea concentrării unor soluții necesare în diferite procese, la concentrații bine precizate.

În general, clasificarea evaporatoarelor se face după modul de încălzire: evaporatoare încălzite cu căldura solară, încălzite cu flacără, încălzite prin serpentine sau manta cu abur, cu sisteme tubulare de încălzire (țevi și fascicul de țevi orizontale sau verticale).

Cele mai folosite evaporatoare sînt cele cu sistemul de încălzire format din fascicul de țevi verticale cu circulație naturală, cu circulație forțată și cu circulație în film a soluției.

Scanned with OKEN Scanner

Evaporatoare cu circulaţie naturală. Cel mai răspîndit aparat din această categorie este evaporatorul vertical cu tub central de circulaţie (fig. II.18). Jumătatea inferioară a acestui aparat reprezintă camera de încălzire, care constă dintr-un fascicul de ţevi *2*, avînd capetele fixate în două plăci tubulare. În centrul sistemului tubular de încălzire, în axa evaporatorului este montat tubul de recirculare *3*, care are diametrul mult mai mare decît celelalte ţevi. Aburul primar intră în spaţiul dintre ţevi, iar soluţia fierbe în ţevile sistemului de încălzire. Circulaţia naturală a soluţiei în evaporator se datorează încălzirii intense a ţevilor fierbătoare subţiri (diametru mic, suprafaţă specifică de încălzire mare), faţă de încălzirea mai redusă în tubul central (diametru mare, suprafaţă specifică de încălzire mică). Jumătatea superioară a aparatului reprezintă spaţiul (camera) vaporilor secundari *4*, avînd diametrul puţin mai mare, pentru a reduce viteza acestora. Vaporii se degajă din soluţie în spaţiul de vapori, trec prin separatoarele de picături *5* (diferite şicane) şi sînt evacuaţi din evaporator prin conducta vaporilor secundari.

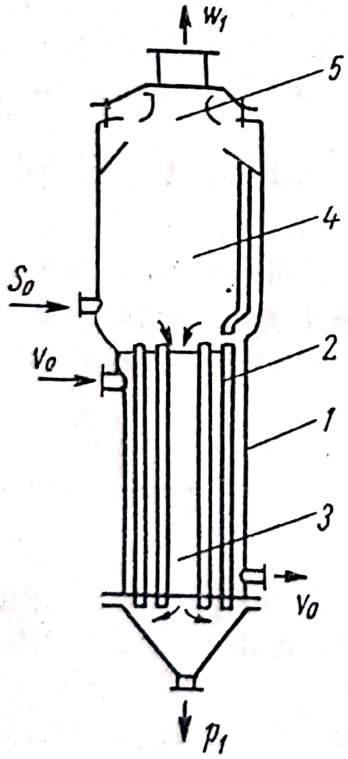

Fig. II.18. Evaporator vertical cu tub central de circulaţie:
1 — manta; *2* — ţevi fierbătoare; *3* — tub central de circulaţie; *4* — spaţiul de vapori; *5* — separator de picături.

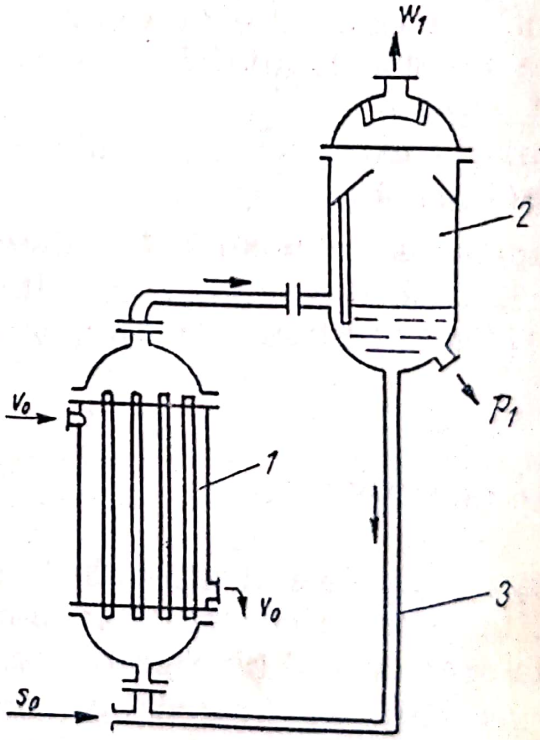

Fig. II.19. Schiţa unui evaporator cu încălzitor exterior:
1 — încălzitor (fierbător) exterior; *2* — separator de lichid; *3* — tub exterior de circulaţie.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru reducerea înălțimii aparatului și obținerea unor productivități mai mari s-au realizat evaporatoarele cu încălzitor exterior (fig. II.19) formate dintr-un schimbător de căldură (încălzitorul exterior) *1* și dintr-un separator de lichid *2*. Soluția de concentrat alimentată la partea inferioară a încălzitorului se transformă în țevile fierbătoare, într-un amestec soluție-vapori, care se ridică cu viteză mare și intră în separatorul de lichid, unde soluția concentrată se separă de vaporii secundari. O parte din soluție este scoasă din separator ca produs final, iar restul este recirculat prin conducta exterioară de circulație *3*.

Evaporatoarele cu circulație naturală au următoarele avantaje: circulație bună a soluției, productivitate bună, montare și demontare ușoară, cost relativ redus.

Dezavantajele lor se referă la: durată mare de rămînere a soluției în evaporator, presiune hidrostatică mare, consum mare de metal, nu sînt indicate pentru soluțiile care depun cruste.

Evaporatoare cu circulație forțată. Pentru intensificarea circulației soluției în vederea măririi coeficientului de transfer termic, în special pentru soluțiile vîscoase, se folosesc evaporatoarele cu circulație forțată. Circulația soluției într-un astfel de evaporator (fig. II.20) se realizează cu ajutorul unei pompe *5*, prin intermediul unei conducte exterioare de circulație *4*. Soluția de concentrat se alimentează prin partea inferioară a camerei de încălzire, circulă prin țevile fierbătoare *1* cu o viteză de 1,5—3,5 m/s și începe să fiarbă în partea superioară a acestora, ieșind apoi cu o viteză mare în spațiul de vapori al evaporatorului. După ce se lovește de o umbrelă de deflecție *2*, unde are loc o primă separare de lichid și o dirijare a vaporilor, amestecul soluție-vapori este complet separat la trecerea prin separatorul de picături *3*. Datorită circulației intense a soluției, evaporatoarele cu circulație forțată au coeficienții totali de transfer de căldură de 3—4 ori mai mari decît cele cu circulație naturală. Din această cauză, pot funcționa la diferențe mici de temperaturi, între aburul primar și soluția supusă concentrării (utilizează abur de presiune joasă).

Dezavantajul principal al acestor evaporatoare este consumul mare de energie al pompei de circulație.

Evaporatoare cu film de soluție. În aparatele din această categorie, soluția supusă evaporării se găsește sub forma unui film subțire mobil (peliculă de soluție) pe o suprafață încălzită. Soluția se evaporă în timpul necesar filmului mobil de a parcurge înălțimea suprafeței încălzitoare.

Scanned with OKEN Scanner

În figura II.21 este schematizat evaporatorul cu film ascendent — evaporatorul Kestner — format din încălzitorul tubular cu țevi lungi *1*, atingînd 6—9 m și din separatorul de picături *3*. Soluția de concentrat este alimentată la partea inferioară a încălzitorului, printr-un dispozitiv care asigură menținerea nivelului constant al lichidului în țevile fierbătoare (1/4—1/5 din lungimea lor), restul lungimii țevilor fiind acoperit de filmul de soluție ascendent, format prin antrenarea soluției de către vaporii secundari rezultați. Pen-

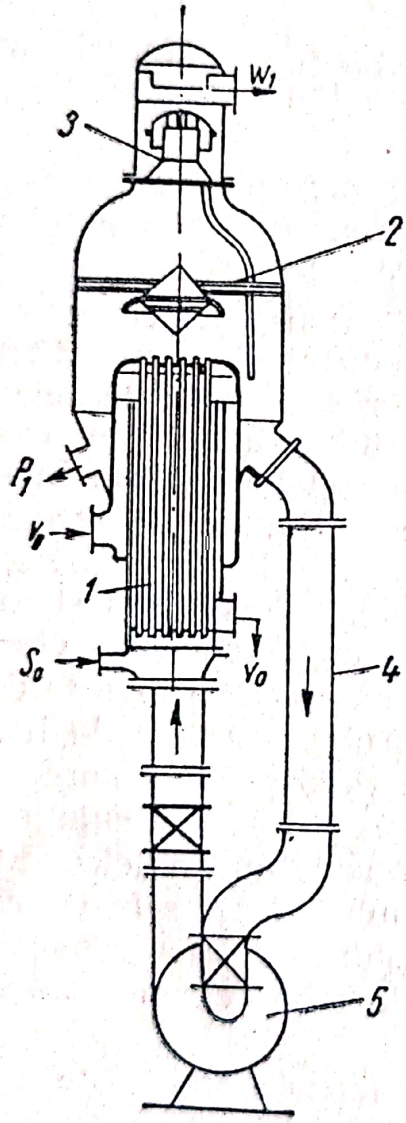

Fig. II.20. Evaporator cu circulație forțată:
1 — încălzitor; *2* — umbrelă de deflecție; *3* — separator de picături; *4* — conductă de circulație exterioară; *5* — pompă de circulație.

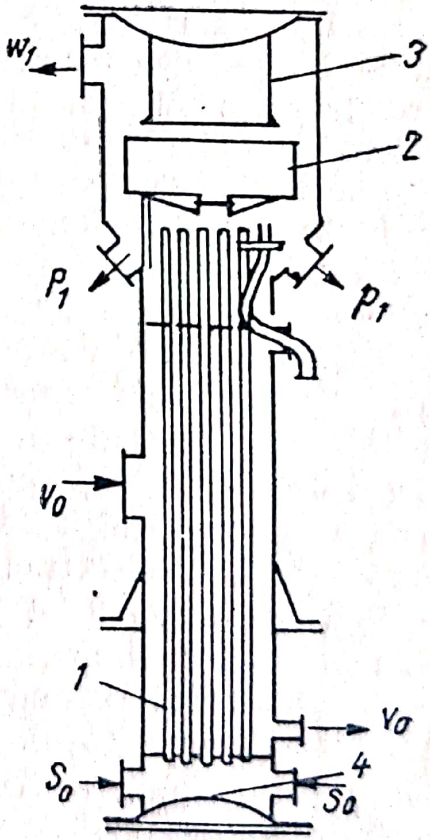

Fig. II.21. Evaporator Kestner:
1 — încălzitor; *2* — umbrelă de deflecție; *3* — separator de picături; *4* — cameră pentru repartizarea soluției.

Scanned with OKEN Scanner

tru concentrarea soluțiilor viscoase se utilizează evaporatoarele cu film descendent.

Evaporatoarele cu film de soluție au următoarele avantaje: durata de evaporare mică, presiune hidrostatică redusă, coeficienți mari de transfer termic, productivitate mare, consum mic de energie. Sînt indicate pentru concentrarea soluțiilor spumante sau vîscoase, a soluțiilor termolabile, sau cînd este necesar să se obțină productivități mari.

Dezavantajele acestor aparate sînt: înălțime mare, dificultatea menținerii nivelului optim al soluției în țevile fierbătoare, curățirea dificilă a țevilor fierbătoare, imposibilitatea folosirii pentru soluții care cristalizează sau depun cruste.

D. CONDENSAREA

Condensarea este operația prin care vaporii saturați, cedînd căldura de vaporizare, trec în stare lichidă, menținîndu-și temperatura constantă. Condensarea se poate aplica fie pentru îndepărtarea vaporilor din instalația care i-a produs (evaporare, distilare, uscare), fie pentru recuperarea vaporilor în stare lichidă (uscare, antrenare cu vapori etc.). Condensarea poate fi utilizată și pentru realizarea și menținerea unei depresiuni într-o instalație; în acest caz, condensarea este însoțită de evacuarea gazelor necondensabile cu ajutorul unei pompe de vid (v. evaporarea multiplă).

Utilajele în care are loc condensarea prin cedarea căldurii latente de vaporizare unui fluid de răcire (apa, aerul) se numesc *condensatoare.*

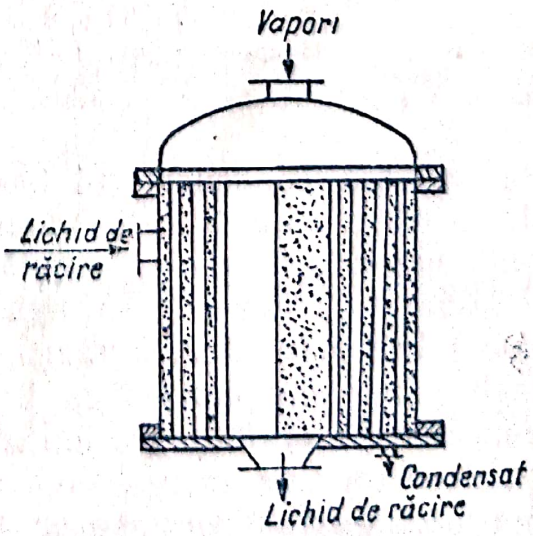

Fig. II.22. Condensator de suprafață spiral montat vertical.

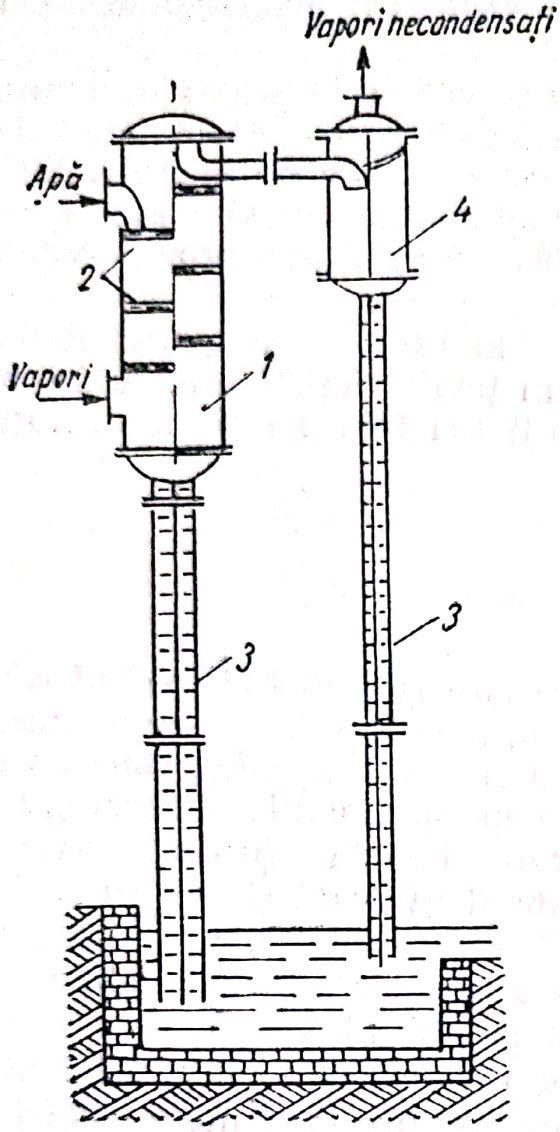

Fig. II.23. Condensator barometric:
1 — mantaua condensatorului; *2* — polițe perforate; *3* — conducte barometrice; *4* — separator de picături.

După modul în care se transmite căldura între vaporii care condensează și fluidul de răcire, condensatoarele se clasifică în:

— condensatoare de suprafață sau indirecte, în care vaporii și fluidul de răcire sînt separați printr-un perete despărțitor;

— condensatoare de amestec sau directe, în care agentul de răcire se amestecă cu vaporii.

Condensatoarele de suprafață se folosesc atunci cînd vaporii condensați sînt prețioși, fiind necesară valorificarea acestora. Se poate folosi orice schimbător de căldură drept condensator de suprafață.

În figura II.22 este schițat un condensator de suprafață spiral, așezat vertical pentru ușurarea evacuării condensatului.

Condensatoarele de amestec se utilizează atunci cînd vaporii nu se recuperează; asigură prin contactul direct dintre vapori și fluidul de răcire un schimb de căldură foarte intens.

În figura II.23 este schițat unul din cele mai folosite condensatoare de amestec, condensatorul barometric, la care contactul între apa de răcire și vaporii de condensat se face prin circulația acestora în contracurent, în ploaia creată cu ajutorul șicanelor perforate *2*. Condensatul, împreună cu apa de răcire, este evacuat printr-o conductă barometrică *3*, a cărei înălțime trebuie să fie atît de mare, încît presiunea coloanei de lichid împreună cu presiunea din condensator să egaleze presiunea atmosferică. Se menționează, că în condensator este depresiune, creată de o pompă de vid care servește evacuării gazelor necondensabile.

Scanned with OKEN Scanner

E. RĂCIREA LA TEMPERATURI JOASE

1. NOȚIUNI GENERALE

Pentru realizarea multor procese tehnologice din industria chimică sînt necesare temperaturi mult mai scăzute decît cele obținute cu ajutorul agenților de răcire obișnuiți (apa, aerul, solele).

Obținerea unor temperaturi foarte coborîte necesită aplicarea unor procedee de răcire (răcirea artificială), care realizează transmiterea căldurii de la corpuri cu temperaturi mai scăzute, la alte corpuri sau în mediul înconjurător, cu temperaturi mai ridicate. Deoarece la trecerea de la temperaturi mici la temperaturi mari, entropia sistemului scade, asemenea procedee de răcire sînt însoțite de *procese suplimentare* (comprimarea, absorbția, adsorbția), a căror energie asigură creșterea sau menținerea constantă a entropiei întregului sistem.

Energia dată de procesul suplimentar (compensator) face posibilă creșterea entropiei sistemului ($\Delta S \geqslant o$), deci face ca sistemul de transmitere a căldurii de la un corp rece la unul cald să fie posibil din punct de vedere termodinamic. Relația care dă variația de entropie a sistemului este:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \qquad \text{(II-7)}$$

unde:

ΔQ este variația cantității de căldură, în J/kg;

ΔT — variația temperaturii între cele două corpuri, în K.

Dacă Q_0 este cantitatea de căldură cedată de corpul care se răcește, T_1 temperatura corpului rece, T_2 temperatura corpului cald, relația (II-7) devine:

$$\Delta S = \frac{Q_0}{T_1} + \frac{Q_0}{T_2} < 0, \qquad \text{(II-8)}$$

unde:

$\frac{Q_0}{T_1}$ este scăderea de entropie a corpului rece (îi dăm semnul minus);

$\frac{Q_0}{T_2}$ — creșterea de entropie a corpului cald (îi dăm semnul plus).

Din relația (II-8) se vede că $\Delta S < 0$, deci procesul nu este posibil. Pentru a-l face posibil, trebuie ca energiei Q_0 cedate, să i se adauge

Scanned with OKEN Scanner

o cantitate de energie q introdusă de procesul suplimentar, astfel încît variaţia de entropie să fie pozitivă:

$$\Delta S = -\frac{Q_0}{T_1} + \frac{Q_0+q}{T_2} \geqslant 0. \qquad \text{(II-9)}$$

Transferul căldurii de la corpul rece la corpul cald este asigurat de către anumite substanţe, numite agenţi frigorigeni.

Agenţii frigorigeni sînt substanţe cu puncte de fierbere scăzute, care îndeplinesc condiţiile: să nu fie toxici, să fie accesibili, să nu fie inflamabili sau explozivi. Aceste condiţii sînt îndeplinite de următoarele substanţe: amoniac, bioxid de carbon, bioxid de sulf, clorura de metil şi mai ales freonii (compuşii fluoro-clorurați ai metanului), care se utilizează pentru realizarea temperaturilor de pînă la —70°C, iar etanul, etena, propanul, propena sînt utilizate pentru realizarea temperaturilor sub —70°C.

2. INSTALAŢII FRIGORIFICE

Instalaţiile frigorifice sînt instalaţiile care fac posibilă transmiterea căldurii de la un corp rece la unul cald, folosind energia introdusă de un proces suplimentar (compensator).

Instalaţiile frigorifice se clasifică după valoarea temperaturii realizate, după procesul care face posibilă reluarea căldurii de la corpul care se răceşte, după natura procesului compensator.

Astfel, ele pot fi:

— instalaţii pentru răcire moderată ($t > -100$°C) (cu comprimare, absorbţie şi adsorbţie);

— instalaţii pentru răcire înaintată ($t < -100$°C) (de detentă prin laminare, de detentă cu producere de lucru mecanic, de detentă combinată).

Instalaţiile frigorifice prin evaporare cu proces suplimentar (comprimarea) (fig. II.24) se bazează pe evaporarea agentului frigorigen în evaporatorul *1*, cînd se preia căldura de la fluidul care răceşte. Vaporii agentului frigorigen, pentru a condensa la temperatura superioară din condensatorul *3* (aici răcirea se face cu agenţi obişnuiţi: apă, aer, solă), trebuie comprimaţi în compresorul *2*, mărindu-le astfel temperatura de condensare (energia introdusă de compresor sub formă de lucru mecanic face posibilă condensarea). Pentru a relua circuitul, condensul, care are presiunea dată de compresor, trebuie destins cu ventilul de laminare *4*, la presiunea din evaporator, făcînd posibilă evaporarea agentului frigorigen la temperatura

Scanned with OKEN Scanner

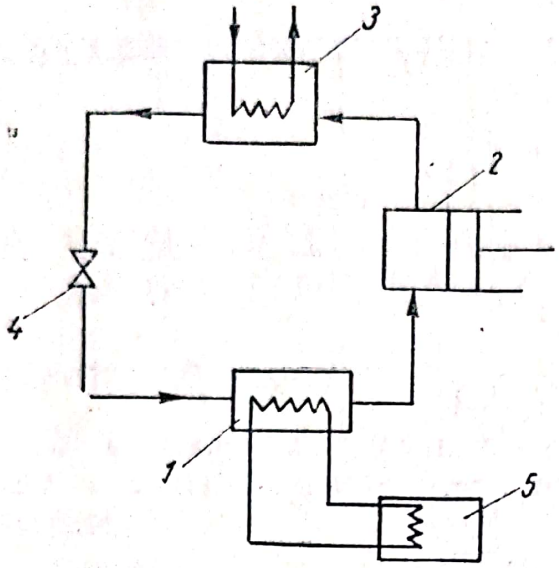

Fig. II.24. Instalație frigorifică prin evaporare cu comprimare:

1 — evaporator; *2* — compresor; *3* — condensator; *4* — ventil de laminare; *5* — aparate care se răcesc.

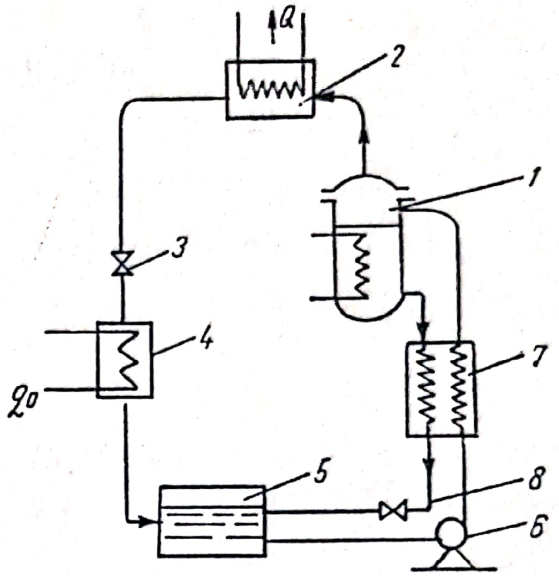

Fig. II.25. Instalația frigorifică cu absorbție:

1 — desorber; *2* — condensator; *3* — ventil de laminare; *4* — evaporator; *5* — absorber; *6* — pompă; *7* — schimbător de căldură; *8* — robinet.

scăzută a fluidului care se răcește. Ventilul de laminare se bazează pe trecerea fluidului de la o secțiune mică la una mai mare, raportul acestora fiind în funcție de raportul presiunilor. Se constată că în instalațiile frigorifice prin evaporare se ține seama de relația dintre presiune și punct de fierbere (punct de condensare).

Instalații frigorifice prin evaporare cu absorbție. În aceste instalații, ridicarea presiunii vaporilor agentului frigorigen de la presiunea de vaporizare la presiunea de condensare se face prin absorbția și desorbția acestora de către un lichid corespunzător, de obicei apa. Spre deosebire de instalația frigorifică cu comprimare, care utilizează energia mecanică, instalațiile cu absorbție utilizează energia termică necesară desorbției vaporilor din lichidul absorbant (fig. II.25).

În instalația din figura II.25 răcirea este continuă, dar în instalații mai mici, ea se poate realiza și discontinuu, prin alternarea fazelor de încălzire și răcire în absorberul *1*, care în acest caz îndeplinește rol dublu de absorber și desorber.

Instalațiile pentru răcire înaintată se folosesc, pentru lichefierea gazelor, cum ar fi: oxigenul, azotul, hidrogenul, heliul, hidrocarburile gazoase.

În figura II.26 este indicată schema unei instalații prin destinderea gazului prin laminare care este realizată după o comprimare

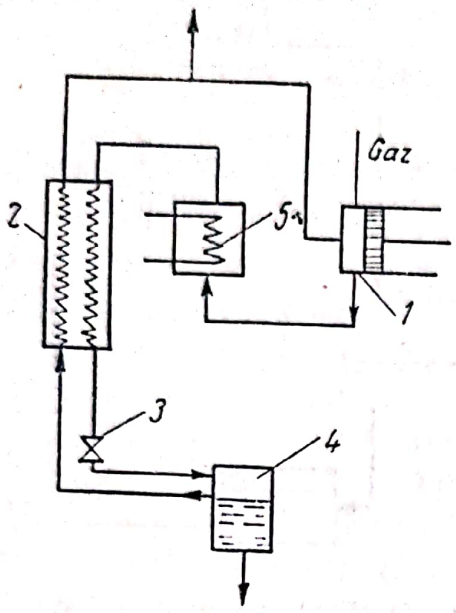

Fig. II.26. Schema instalației frigorifice prin destindere prin laminare (procedeul Linde):

1 — compresor; *2* — răcitor special; *3* — ventil de laminare; *4* — rezervor de gaz lichefiat; *5* — răcitor obișnuit.

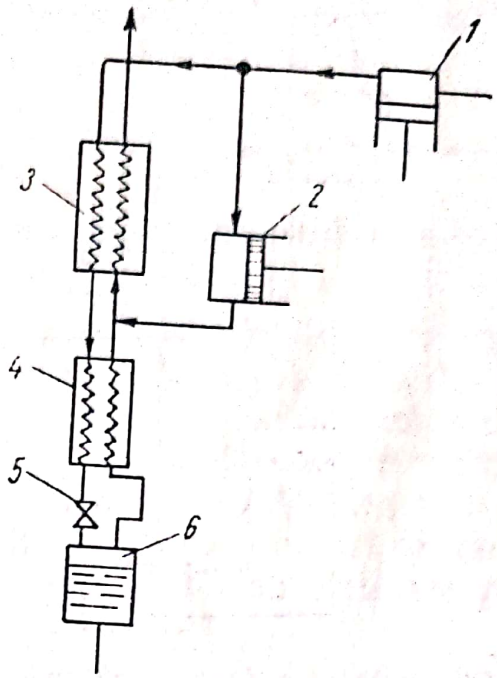

Fig. II.27. Instalația frigorifică funcționînd după procedeul Heyland:

1 — compresor; *2* — detentor; *3*, *4* — răcitoare; *5* — ventil de laminare; *6* — rezervor.

(20—200 at) în compresorul instalației *1*, destindere însoțită de o lichefiere parțială datorită răcirii pronunțate a gazului. Acest procedeu se mai numește și procedeul Linde, fiind folosit pentru obținerea oxigenului, azotului, prin lichefierea lor din aer.

În figura II.27 este schițată o instalație de lichefiere a gazelor, în care destinderea se produce atît prin laminare (ventilul de laminare *5*), cît și prin destindere cu producere de lucru mecanic (în detentorul *2*). Acest procedeu (numit și procedeul lui Heyland) are avantajul unei economii de lucru mecanic (prin recuperare în detentor).

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL III

OPERAȚII ȘI PROCESE DE DIFUZIUNE

A. BAZELE TEORETICE ALE PROCESULUI DE TRANSFER DE MASĂ

1. NOȚIUNI GENERALE

În industria chimică și petrochimică, în urma reacțiilor chimice sau a transformărilor fizice rezultă amestecuri omogene sau eterogene.

Separarea fizică a amestecurilor omogene gazoase, lichide sau solide, în urma căreia are loc introducerea sau îndepărtarea unor substanțe (componenți) din amestecul considerat, se numește **operația de transfer de masă** *(substanță), iar procesele care au loc în timpul acestor operații se numesc* **procese de transfer de masă** *sau* **procese de difuziune.**

Procesul de transfer de masă constă în trecerea substanței dintr-o fază în altă fază aflată în contact. Schimbul de substanță între fazele în contact, presupune deplasarea relativă a componenților în fiecare fază, deplasare numită *difuziune.* Direcția de deplasare este dată de sensul de variație a concentrației componenților în fazele respective. Difuziunea are loc prin suprafața de contact (interfață), formată în urma contactului nemijlocit între cele două faze.

Difuziunea poate fi: *moleculară,* rezultată din deplasări moleculare și *convectivă,* rezultată din deplasări ale unor porțiuni macroscopice din masa fluidului aflat în mișcare turbulentă. Difuziunea convectivă este însoțită întotdeauna de difuziunea moleculară.

Procesele de transfer de masă sînt procese reversibile, adică substanța poate să treacă dintr-o fază în alta, în funcție de concentrația ei în cele două faze și de condițiile de echilibru.

În industria chimică sînt folosite următoarele operații unitare cu transfer de masă: absorbția, distilarea, extracția, fluidizarea, adsorbția, cristalizarea, sublimarea și uscarea.

Viteza acestor procese este determinată de viteza de trecere a substanței dintr-o fază în alta (viteza procesului de transfer de masă). Pentru a determina această viteză cît și direcția procesului de transfer de masă trebuie să se cunoască compoziția fazelor.

Scanned with OKEN Scanner

În transferul de masă se aplică două moduri principale de exprimare a compoziției fazelor, și anume: sub formă de fracții și sub formă de rapoarte. Ele pot fi fracții sau rapoarte masice, molare și volumice. Prin înmulțirea fracțiilor cu o sută, se obține compoziția procentuală. De exemplu, dacă se consideră un amestec binar compus din componentul A și componentul B, atunci compoziția lui poate fi exprimată prin:

— *Fracții masice* (a_A sau a_B), sub forma unor rapoarte între masa fiecărui component și masa întregii faze:

$$a_A = \frac{G_A}{G_A + G_B}, \qquad \text{(III-1)}$$

unde:

a_A este fracția masică a componentului A;

G_A — masa componentului A în amestec, în kg;

G_B — masa componentului B în amestec, în kg.

— *Fracții molare* (x_A sau x_B), sub forma unor rapoarte între numărul de moli (kmoli) al fiecărui component și numărul total de moli (kmoli) în amestec:

$$x_A = \frac{n_A}{n_A + n_B}, \qquad \text{(III-2)}$$

unde:

x_A este fracția molară a componentului A;

n_A — numărul de moli (kmoli) ai componentului A din amestec;

n_B — numărul de moli (kmoli) ai componentului B din amestec.

De obicei, prin x se notează fracția molară a componentului în faza lichidă, iar prin y, fracția molară a componentului în faza gazoasă.

Fracțiile masice se transformă în fracții molare cu următoarea formulă:

$$x_A = \frac{\frac{a_A}{M_A}}{\frac{a_A}{M_A} + \frac{a_B}{M_B}}, \qquad \text{(III-3)}$$

unde M_A și M_B sînt masele moleculare a componentului A și a componentului B.

Scanned with OKEN Scanner

Transformarea fracțiilor molare în fracții masice se face după formula:

$$a_A = \frac{X_A M_A}{X_A M_A + X_B M_B} \qquad \text{(III-4)}$$

unde numitorul reprezintă masa moleculară medie a amestecului.

— *Rapoarte molare* (X sau Y) care reprezintă raportul între numărul de moli (kmoli) a componentului A și a numărului de moli (kmoli) a componentului B:

$$X = \frac{X_A}{X_B} = \frac{X_A}{1 - X_A}. \qquad \text{(III-5)}$$

Exprimarea compoziției fazelor prin raporturi molare (masice, volumice), poate fi folosită numai în cazul amestecurilor binare.

Pentru amestecuri gazoase, compoziția fazelor se exprimă și prin presiuni parțiale (p_A sau p_B), care reprezintă presiunea sub care s-ar găsi componentul respectiv dacă ar ocupa singur volumul total al amestecului. Între presiunea parțială a componentului și fracția lui molară există următoarea relație:

$$p_k = y_k \cdot P, \qquad \text{(III-6)}$$

unde P este presiunea totală a amestecului gazos, în N/m².

2. ECHILIBRUL ÎNTRE FAZE, DIAGRAME DE ECHILIBRU

Ca și procesele cu transfer de căldură și procesele cu transfer de masă au loc pînă cînd între cele două faze se stabilește un echilibru dinamic. Se presupune că două faze, faza G și faza L (fig. III.1), se pun în contact, iar componentul k care trece dintr-o fază în alta, la început se află numai în faza G și are concentrația y_k.

În momentul punerii în contact a celor două faze, începe trecerea componentului k din faza G în faza L. În momentul apariției componentului k în faza L, începe un proces invers de trecere a componentului din faza L înapoi în faza G. Viteza acestui proces invers crește pe măsura creșterii concentrației componentului k în faza L. La un moment dat, viteza procesului de trecere a componentului din faza G în faza $L(v_1)$ devine egală cu viteza de trecere a componentului din faza L în faza $G(v_2)$:

$$v_1 = v_2. \qquad \text{(III-7)}$$

Scanned with OKEN Scanner

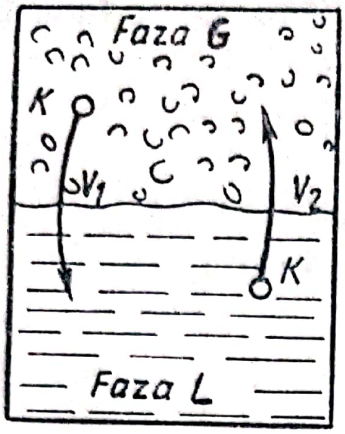

Fig. III.1. Stabilirea echilibrului dinamic.

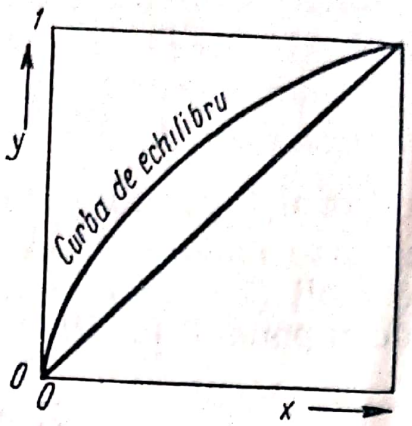

Fig. III.2. Diagrama de echilibru.

În acest moment, aparent între cele două faze nu se realizează transfer de substanță, deoarece cantitățile de component care trec în unitatea de timp și prin unitatea de suprafață de contact sînt egale. Se spune că între cele două faze s-a stabilit un echilibru dinamic.

În condițiile de echilibru, fiecărei concentrații a componentului x_k în faza L (fază în care are loc transferul de substanță) îi corespunde o concentrație de echilibru y_k în faza G (fază din care are loc transferul). Această corespondență se exprimă printr-o relație de echilibru:

$$y_k = f(x_k). \qquad \text{(III-8)}$$

Prin reprezentarea grafică a ecuațiilor de echilibru într-un sistem de coordonate corespunzător concentrațiilor în cele două faze se obține diagrama de echilibru, în care echilibrul dintre compozițiile celor două faze se exprimă printr-o linie dreaptă sau curbă, numită *linie de echilibru* (fig. III-2).

Condițiile de echilibru exprimate prin ecuația (III-8) permit determinarea direcției în care are loc procesul respectiv de transfer de masă. Dacă concentrația componentului y_k în faza G este mai mare decît concentrația de echilibru, componentul va trece din faza G în faza L, forța motrice a acestui proces fiind egală cu:

$$\Delta y_1 = y_k - y_k^*. \qquad \text{(III-9)}$$

Dacă concentrația componentului y_k în faza G, va fi mai mică decît concentrația de echilibru, componentul va trece din faza L în faza G, forța motrice a acestui proces fiind egală cu:

$$\Delta y_2 = y_k^* - y_k. \qquad \text{(III-10)}$$

Scanned with OKEN Scanner

3. VITEZA PROCESELOR DE TRANSFER DE MASĂ. ECUAȚIA GENERALĂ DE TRANSFER DE MASĂ

Viteza proceselor de transfer de masă reprezintă cantitatea de substanță care trece dintr-o fază în alta, în unitatea de timp. Această cantitate este direct proporțională cu suprafața de contact între cele două faze și cu forța motrice a procesului, adică:

$$m_k = K \cdot A \cdot \Delta m, \qquad \text{(III-11)}$$

unde:

m_k este cantitatea de component care trece dintr-o fază în alta, în kg/s sau kmoli/s;

K^* — coeficientul total de transfer de masă;

A — suprafața de contact între cele două faze, în m^2;

Δm — forța motrice medie a procesului.

Ecuația (III-11) reprezintă ecuația generală de transfer de masă, pe baza ei calculîndu-se suprafața de contact necesară realizării procesului de transfer de masă.

B. ABSORBȚIA

1. BAZELE TEORETICE ALE ABSORBȚIEI

Absorbția este operația unitară de separare a unuia sau a mai multor componenți dintr-un amestec omogen gazos prin dizolvare într-un lichid numit absorbant.

Operația se realizează prin punerea în contact a două faze fluide (amestecul gazos și lichidul absorbant). Dacă între lichidul absorbant și componentul absorbit au loc reacții chimice, operația se numește *chemosorbție*. Operația inversă absorbției (trecerea înapoi în faza gazoasă a componentului absorbit) poartă denumirea de *desorbție*.

În industria chimică, operația de absorbție reprezintă una dintre fazele principale ale procesului tehnologic. De exemplu, absorbția HCl gazos în apă, la fabricarea acidului clorhidric soluție. De asemenea, absorbția este folosită pentru purificarea unor materii prime

---

* K reprezintă cantitatea de component care trece dintr-o fază în alta, în unitatea de timp, prin unitatea de suprafață, cînd forța motrice este egală cu unitatea. El depinde de natura componentului de separare.

Scanned with OKEN Scanner

gazoase ca şi pentru reţinerea unor componenţi toxici din gazele reziduale evacuate în atmosferă.

Absorbţia reprezintă un proces tipic de difuziune: componentul k din faza gazoasă G difuzează către interfaţă gaz-lichid, se dizolvă la interfaţă în lichidul absorbant, trecînd apoi prin difuziune, în faza lichidă (L). Sensul de deplasare a substanţei care difuzează corespunde sensului de descreştere a concentraţiei componentului k în faza gazoasă (fig. III.3).

Pentru sistemul gaz-lichid, parametrii variabili care influenţează procesul sînt: concentraţia componentului în cele două faze, temperatura şi presiunea. Temperatura influenţează negativ procesul de absorbţie (cu creşterea temperaturii, scade solubilitatea gazelor în lichide), iar presiunea influenţează pozitiv procesul de absorbţie (cu creşterea presiunii creşte solubilitatea gazelor în lichide). Viteza procesului de absorbţie depinde şi de selectivitatea lichidului absorbant, adică de însuşirea lui de a dizolva cu precădere componentul respectiv al amestecului gazos.

Relaţia între concentraţie şi presiunea de echilibru este dată de legea lui Henry, conform căreia presiunea parţială de echilibru p_k^* a unui component k în faza gazoasă sau de vapori la temperatură constantă este funcţie de fracţia molară a componentului respectiv în faza lichidă (x_k), adică:

$$p_k^* = H_k \cdot x_k, \qquad \text{(III-12)}$$

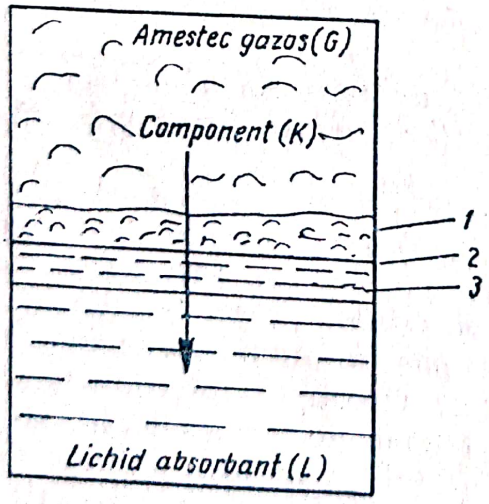

Fig. III.3. Schema procesului de absorbţie:
1 — pelicule de gaz (strat limită); 2 — interfaţă (suprafaţa de separare); 3 — pelicule de lichid absorbant (strat limită).

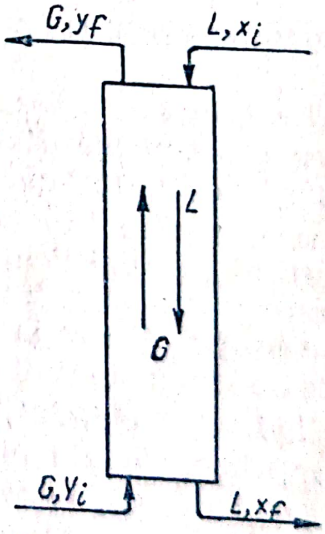

Fig. III.4. Schema unei coloane de absorbţie.

unde:

p_k^* este presiunea parțială de echilibru a componentului, în N/m²;

H_k — constanta lui Henry pentru componentul k, în N/m².

Valoarea constantei lui Henry pentru componentul gazos dat, depinde de natura componentului și a lichidului absorbant și de temperatură. Ea are valori mari pentru gaze greu solubile în lichide și valori mici pentru gaze ușor solubile.

Bilanțul de materiale. Pentru absorberul schițat în figura III.4, bilanțul de materiale este:

$$m_k = G(Y_i - Y_f) = L(X_f - X_i), \qquad \text{(III-13)}$$

unde:

G este debitul de gaz (componentul gazos care nu participă în procesul de transfer de masă);

Y_i, Y_f — concentrația inițială și finală a componentului k în faza gazoasă;

L — debitul de lichid absorbant;

X_i și X_f — concentrația inițială și finală a componentului k în fază lichidă.

Consumul de lichid absorbant va fi:

$$L = \frac{Y_i - Y_f}{X_f - X_i} \cdot G, \qquad \text{(III-14)}$$

iar consumul specific de lichid absorbant:

$$l = \frac{L}{G} = \frac{Y_i - Y_f}{X_f - X_i}. \qquad \text{(III-15)}$$

Ecuația (III-15) poate fi scrisă și sub forma:

$$Y_i - Y_f = 1(X_f - X_i), \qquad \text{(III-16)}$$

care reprezintă ecuația *dreptei de operație pentru absorbție* (dreapta care reprezintă concentrațiile celor două faze în lungul coloanei, numite concentrații de lucru).

2. TIPURI DE ABSORBERE

Aparatele în care se realizează procesul de absorbție se numesc *absorbere*. Construcția absorberelor urmărește asigurarea unor condiții cît mai bune de desfășurare a procesului, atît în privința supra-

Scanned with OKEN Scanner

feței de contact între cele două fluide, cît și în ceea ce privește vitezele și sensul de deplasare a lor. În absorbere, circulația fluidelor se face întotdeauna în contracurent, lichidul absorbant circulă de obicei de sus în jos, iar amestecul gazos de jos în sus.

După modul de realizare a suprafeței de contact, absorberele se clasifică în:

— absorbere prin barbotare, în care absorbția se realizează în timpul barbotării amestecului prin stratul de lichid absorbant;

— absorbere prin barbotare, în care absorbția se realizează în timpul barbotării amestecului prin stratul de lichid absorbant;

— absorbere cu pulverizarea lichidului absorbant, în care absorbția se realizează în timpul trecerii amestecului gazos printr-o ploaie de lichid absorbant.

a. Absorbere de suprafață

Absorberele de suprafață se folosesc în cazul absorbției gazelor ușor solubile în lichidul absorbant respectiv (de exemplu, absorbția HCl în apă). Suprafața de contact între cele două faze este mică.

Absorber de suprafață multitubular, vertical (fig. III.5) este asemănător cu schimbătoarele de căldură multitubulare, în care lichidul absorbant, distribuit printr-un închizător hidraulic în partea superioară, se prelinge sub formă de film descendent pe suprafața interioară a țevilor în contracurent cu amestecul gazos. Căldura de absorbție se îndepărtează prin răcire cu apă, care circulă prin spațiul intertubular.

Absorber de suprafață tip coloană cu umplutură. Acest utilaj are forma unui turn, prevăzut cu un grătar perforat pe care se introduce umplutură de diferite forme (inele Raschig, inele Lessing) prin care lichidul absorbant curge sub forma unei pelicule fine, în contracurent cu amestecul gazos (fig. III.6). Pentru funcționarea acestor absorbere este necesar asigurarea unei distribuții a lichidului absorbant în întreaga secțiune a coloanei. Lichidul absorbant are tendința de a curge către pereții coloanei, astfel încît secțiunea centrală a coloanei va fi insuficient udată cu lichid. Pentru a evita acest fenomen (efect de perete) se recomandă montarea în lungul stratului de umplutură la distanțe de 1,5—2 m a unor conuri de redistribuire a lichidului absorbant.

Absorberele de suprafață tip coloană cu umplutură sînt cele mai răspîndite în industria chimică datorită avantajelor pe care le au: suprafață mare de contact între cele două faze, construcție simplă, posibilitatea construirii din materiale rezistente la coroziune chi-

Scanned with OKEN Scanner

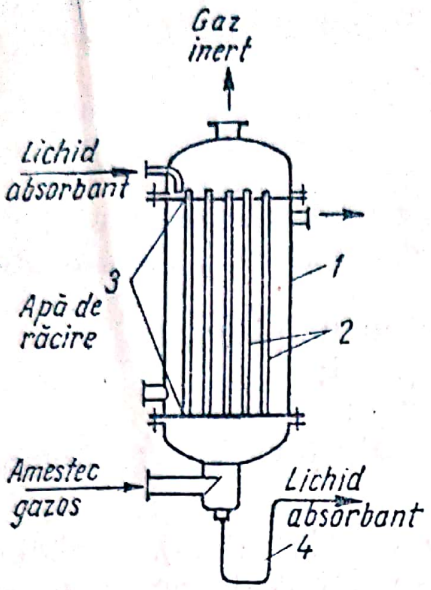

Fig. III.5. Absorber tubular:

1 — corpul absorberului; *2* — fascicul de țevi; *3* — plăci tubulare.

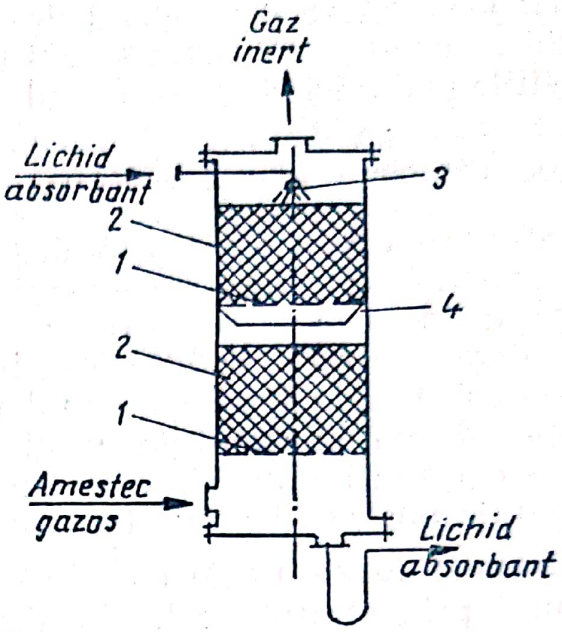

Fig. III.6. Coloană de absorbție cu umplutură:

1 — grătar; *2* — umplutură; *3* — distribuitor de lichid absorbant; *4* — con de redistribuirea lichidului absorbant.

mică, întreținere ușoară etc. Ele prezintă și unele dezavantaje, cum sînt: dificultăți de evacuare a căldurii de absorbție, funcționare defectuoasă la debite mici de lichid absorbant, imposibilitatea utilizării pentru fluide cu impurități mecanice.

Absorber de suprafață tip răcitor din igurit (fig. III.7). Pentru absorbția acidului clorhidric gazos în apă, în ultimul timp se folosesc absorbere tip răcitor de igurit care sînt executate din plăci de igurit (grafit impregnat cu rășină fenol-formaldehidică) asamblate, astfel

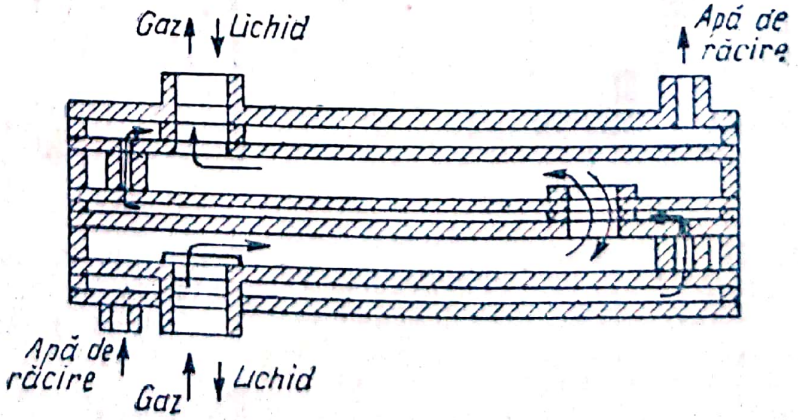

Fig. III.6. Absorber tip răcitor din igurit.

încît să formeze două spații de curgere. Prin spațiile mai largi circulă în contracurent amestecul gazos și lichidul absorbant, iar prin spațiile mai mici circulă agentul de răcire.

b. Absorbere prin barbotare

Suprafața de contact se realizează prin trecerea amestecului gazos divizat în bule mici prin stratul de lichid absorbant. Aceste absorbere sînt de următoarele tipuri:

— coloană de absorbție prin barbotare cu umplutură;
— coloană de absorbție cu talere cu clopoței;
— coloană de absorbție cu talere perforate;
— coloană de absorbție cu talere perforate fără tuburi deversoare (cu prăbușirea lichidului absorbant).

Coloane de absorbție cu talere cu clopoței (fig. III.8). Barbotarea gazului prin stratul de lichid absorbant se datorește construcției și fixării clopoțeilor. Amestecul gazos intră prin conducte scurte (gîturile clopotelor), străbate spațiul inelar dintre gît și clopot, fiind apoi divizat în bule prin trecerea lui prin ferestrele (fantele) sau dinții clopotului și sub această formă, barbotează prin stratul de lichid.

Lichidul absorbant curge de pe talerul superior prin conducta deversoare, care stabilește nivelul lichidului de pe taler. Pentru a asi-

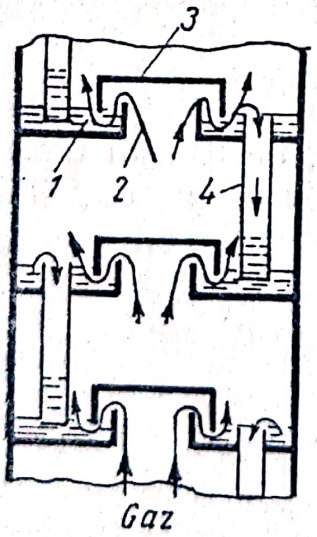

Fig. III.8. Coloană cu talere și clopoței:
1 — taler; *2* — ștuț de circulație pentru gaze; *3* — clopoței; *4* — tuburi deversoare.

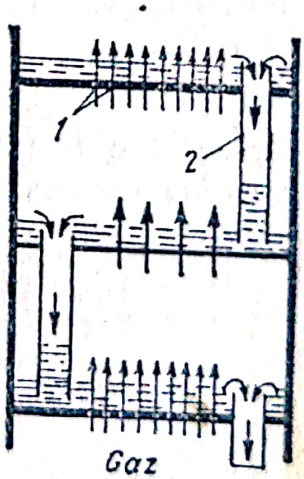

Fig. III.9. Coloană cu talere perforate:
1 — orificii; *2* — tub deversor.

Scanned with OKEN Scanner

gura închiderea hidraulică între talere, capătul inferior al tubului deversor este scufundat în lichidul absorbant aflat pe talerul următor.

Coloane de absorbţie cu talere perforate (fig. III.9). Talerele acestor coloane sînt table perforate (sau site) cu diametrul orificiilor de 2—5 mm, orificii prin care trece amestecul gazos, barbotînd apoi prin stratul de lichid, aflat pe taler. Lichidul absorbant circulă de pe un taler pe altul, ca şi în cazul talerelor cu clopote, prin tuburi deversoare. În regim de lucru normal al coloanei, lichidul nu curge prin orificiile talerului, fiind menţinut pe taler de presiunea gazului. Coloanele cu talere perforate se caracterizează prin simplitatea construcţiei şi prin eficacitatea ridicată, însă au sensibilitate faţă de variaţia debitelor de lichid absorbant şi de gaz, lucrînd eficient numai între anumite limite ale vitezei amestecului gazos.

c. Absorbere cu pulverizarea lichidului absorbant

Absorberele cu pulverizarea lichidului sînt: scrubere fără umplutură şi scrubere mecanice.

Scruberul fără umplutură este format dintr-o coloană goală la partea superioară, prevăzută cu un dispozitiv de pulverizare a lichidului absorbant (mecanic, pneumatic sau centrifugal). Amestecul gazos circulă de jos în sus, în contracurent cu lichidul absorbant. Pentru separarea picăturilor de lichid antrenate, la ieşire, gazul inert trece printr-un strat de umplutură.

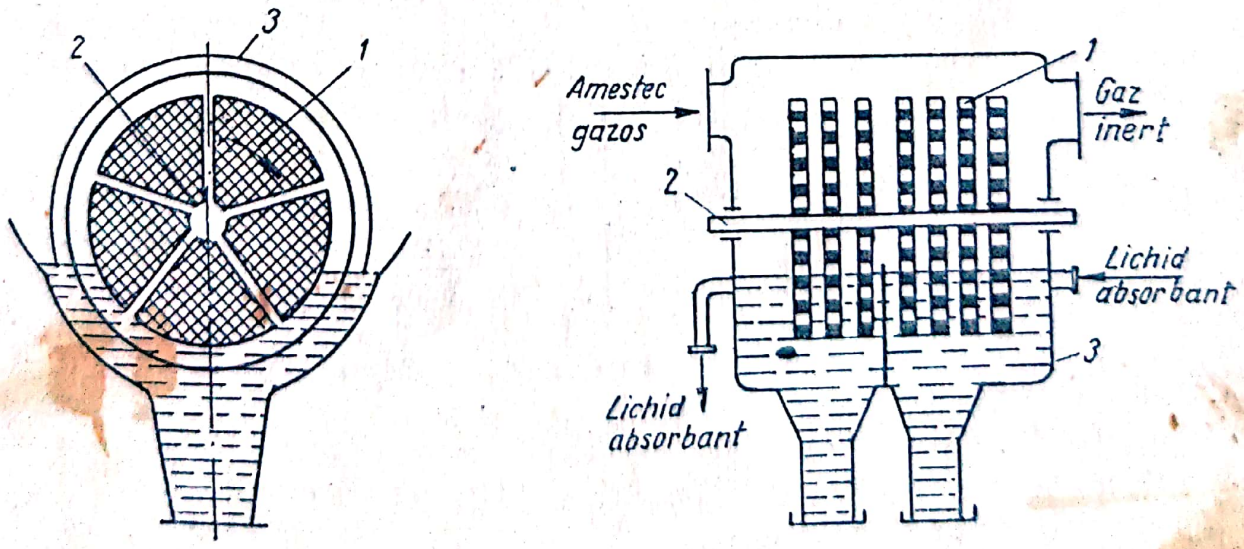

Fig. III.10. Scruber mecanic cu arbore orizontal:
1 — discuri perforate; *2* — arbore; *3* — carcasa scruberului.

Scruberul mecanic cu ax orizontal (fig. III.10) este prevăzut cu o serie de discuri perforate pentru pulverizare. Ele sînt fixate pe un arbore orizontal rotativ, astfel încît sînt parțial scufundate în lichidul absorbant care se găsește la partea inferioară a scruberului. În timpul rotirii, lichidul absorbant este antrenat de către discurile rotative și pulverizat sub formă de picături fine. Suprafața de contact între cele două faze se mărește și datorită trecerii amestecului gazos prin orificiile discurilor umezite cu lichid absorbant.

3. INSTALAȚII DE ABSORBȚIE ȘI DESORBȚIE

Pentru regenerarea lichidului absorbant, absorbția este urmată de cele mai multe ori de desorbție (separarea componentului dizolvant în lichid absorbant). Desorbția se poate realiza cu ajutorul unui curent de gaz inert, prin încălzirea lichidului absorbant cu componentul absorbit, prin depresiune (vid).

În figura III.11 este redată schema unei instalații de absorbție și desorbție. Amestecul gazos este trecut în contracurent cu lichidul absorbant prin coloana de absorbție *1*. Lichidul absorbant, împreună cu componentul absorbit, trece prin schimbătorul de căl-

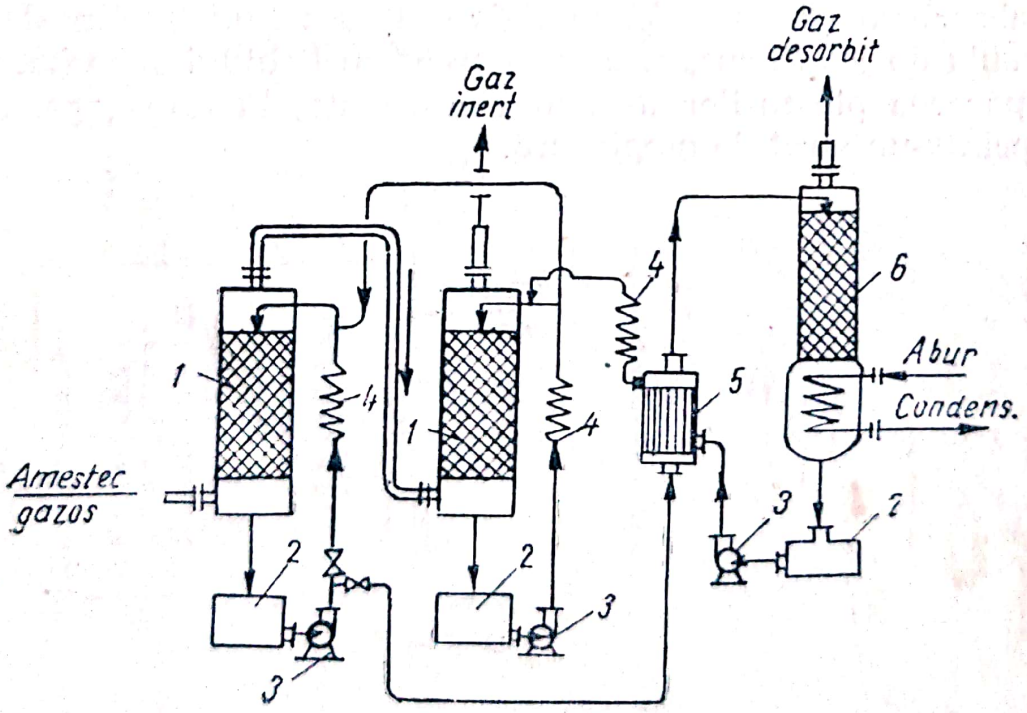

Fig. III.11. Instalație de absorbție-desorbție:
1 — absorber; *2* — rezervoare de lichid absorbant; *3* — pompe de recirculare; *4* — răcitoare; *5* — schimbător de căldură; *6* — desorber.

Scanned with OKEN Scanner

dură 5 în coloana de desorbție 6, unde se realizează regenerarea lui prin încălzire. Lichidul absorbant regenerat se recirculă cu ajutorul pompei 3, la instalația de absorbție.

C. DISTILAREA ȘI RECTIFICAREA

1. BAZELE TEORETICE ALE DISTILĂRII

Distilarea este operația unitară de separare a unui component sau mai multor componenți dintr-un amestec omogen lichid.

Separarea prin distilare, sau prin rectificare se bazează pe diferența între temperaturile de fierbere și între presiunile de vapori ale componenților care formează amestecul. În timpul fierberii, vaporii degajați din amestecul de lichide sînt mai bogați în componenți ușor volatili, lichidul rămas îmbogățindu-se în componenți greu volatili. Vaporii degajați și condensați formează fracțiunea numită *distilat* iar lichidul rămas nevaporizat, constituie *reziduul* de bază. O succesiune de vaporizări și condensări poartă denumirea de *rectificare.*

În cazul amestecurilor de lichide, temperatura de fierbere depinde atît de presiunea sub care are loc fierberea, cît și de compoziția amestecului. La o presiune constantă, temperatura de fierbere a amestecului crește odată cu evaporarea componenților ușor volatili, ca rezultat al îmbogățirii fazei lichide în componenți greu volatili.

Operației de distilare și rectificare se supun următoarele amestecuri de lichide:

— amestecuri binare (formate din doi componenți);

— amestecuri multicomponente (formate din trei sau mai mulți componenți);

— amestecuri complexe; nu se cunoaște exact numărul și natura componenților (țițeiul).

În funcție de solubilitatea componenților, amestecurile de lichide binare pot fi: miscibile, parțial miscibile (între anumite proporții și între anumite temperaturi) și total nemiscibile. La rîndul lor, amestecurile miscibile se împart în amestecuri ideale (fără punct de fierbere constant) și reale (cu temperatura de fierbere maximă sau minimă). Aceste amestecuri se mai numesc și amestecuri azeotrope.

Pentru exemplificare se iau două lichide miscibile, ca benzenul și toluenul. Dacă se trece pe axa absciselor compoziția amestecului și pe axa ordonatelor, temperatura de fierbere și de condensare se poate

Scanned with OKEN Scanner

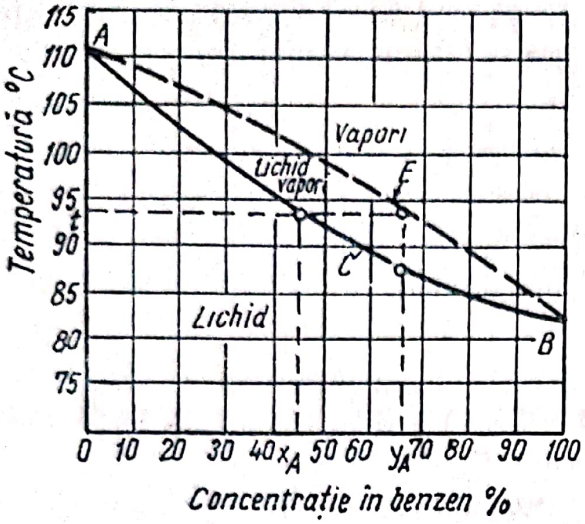

Fig. III.12. Diagrama de fierbere pentru amestecul benzen-toluen la 760 torr.

construi diagrama de fierbere (fig. III-12). Curba de fierbere *ACB* și de condensare *AED* reprezintă variația temperaturii de fierbere și de condensare în funcție de compoziția amestecului. Din analiza diagramei se desprind următoarele:

— pentru orice compoziție a amestecului, temperatura de fierbere este inferioară temperaturii de condensare a vaporilor. Aceste temperaturi sînt cu atît mai apropiate, cu cît amestecul este mai concentrat în unul din componenți;

— temperatura de fierbere crește pe măsură ce amestecul se îmbogățește în componentul greu volatil (în cazul dat, în toluen):

— la o temperatură dată t, compoziția fazei lichide este X_1, iar aceea a fazei de vapori este Y_1.

În cazul distilării unui amestec binar, vaporii se îmbogățesc continuu în componentul care adăugat amestecului lichid îi micșorează temperatura de fierbere (în exemplu dat, în benzen).

Asemenea amestecuri binare (ideale) se supun legii lui Raoult, conform căreia presiunea parțială a unui component în fază de vapori, în echilibru cu faza lichidă, este egală cu produsul dintre presiunea de vapori a componentului pur și fracția molară a componentului în faza lichidă, la temperatura de fierbere a amestecului.

$$p_k^* = p_k \cdot x_k, \qquad \text{(III-17)}$$

unde:

p_k^* este presiunea parțială de echilibru a componentului în faza de vapori, în N/m²;

p_k — presiunea de vapori a componentului în stare pură, în N/m²;

x_k — fracția molară a componentului în fază lichidă.

Trecerea de la presiunea parțială la fracția molară se face pe baza legii lui Dalton, conform căreia fracția molară a unui component dintr-un amestec gazos (vapori) este egală cu raportul dintre presiunea parțială a componentului și presiunea totală a amestecului:

$$y_k = \frac{P_k}{P_t}, \qquad \text{(III-18)}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde:

y_k este fracţia morală a componentului în faza gazoasă;

P_t — presiunea totală a amestecului, în N/m²;

P_k — presiunea parţială a componentului în faza gazoasă, în N/m².

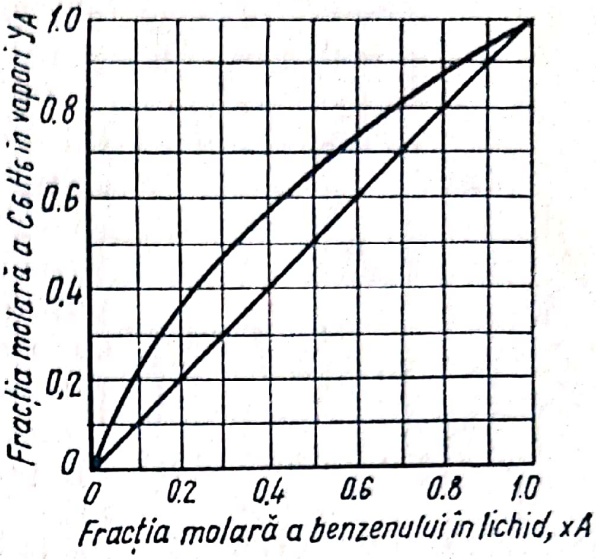

Fig. III.13. Diagrama y—x pentru amestec cu benzen-toluen.

Prin combinarea legii lui Raoult (III—17) cu legea lui Dalton (III—18) se obţin relaţiile de calcul ale compoziţiilor de echilibru la un sistem bifazic lichid-vapori. Aceste relaţii pot fi redate într-o diagramă de echilibru care are pe abscisă compoziţia lichidului x, iar pe ordonată, compoziţia vaporilor y în echilibru cu lichidul (fig. III.13). Dependenţa între compoziţia vaporilor y în echilibru cu lichidul de compoziţie x este redată de curba de echilibru y şi x reprezentînd fracţia molară a componentului uşor volatil în faza de vapori şi respectiv în faza lichidă.

Amestecurile azeotrope au la o anumită compoziţie, temperatura de fierbere constantă (mai mare sau mai mică decît temperatura de fierbere a componenţilor puri).

Pentru amestecurile azeotrope este caracteristic existenţa punctului *azeotrop* (punctul în care curba de echilibru intersectează diagonala), adică $y=x$. Asemenea amestecuri nu pot fi separate în componenţi prin distilare, deoarece compoziţia vaporilor formaţi este egală cu compoziţia lichidului în fierbere.

2. PROCEDEE DE DISTILARE

În industria chimică se folosesc frecvent următoarele procedee de distilare: distilarea simplă, distilarea cu vapori de apă, rectificarea (fracţionarea), iar în cazuri speciale, distilarea azeotropă, distilarea extractivă şi distilarea moleculară.

a. Distilarea simplă

Distilarea simplă se foloseşte în cazurile cînd nu este necesară o separare completă a amestecului, sau cînd se urmăreşte eliminarea

Scanned with OKEN Scanner

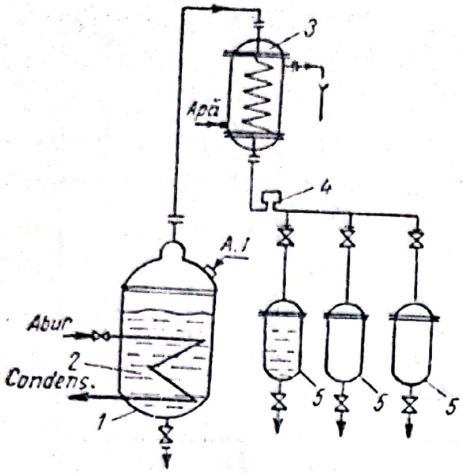

Fig. III.14. Instalație de distilare simplă:
1 — blaz de distilare; *2* — serpentină de încălzire; *3* — răcitor condensator; *4* — vizor; *5* — vase colectoare de fracție.

din amestecurile lichide a impurităților nevolatile sau greu volatile.

Procesul constă în fierberea amestecului, eliminarea vaporilor formați și condensarea lor într-un răcitor condensator. În figura III.14 este reprezentată schema unei instalații de distilare simplă, compusă dintr-un blaz de distilare *1*, prevăzut cu o serpentină de încălzire *2*, în care se introduce amestecul inițial supus distilării. Vaporii formați prin fierberea amestecului trec în răcitorul condensator *3*, unde prin răcire (cu apă), se condensează. Condensatul obținut (distilatul) trece într-un rezervor de depozitare *6*. Pentru concentrarea vaporilor în component ușor volatil, la partea superioară a blazului de distilare se montează un condensator numit în acest caz deflegmator în care are loc condensarea vaporilor componentului greu volatil și reîntoarcerea condensatului în blaz.

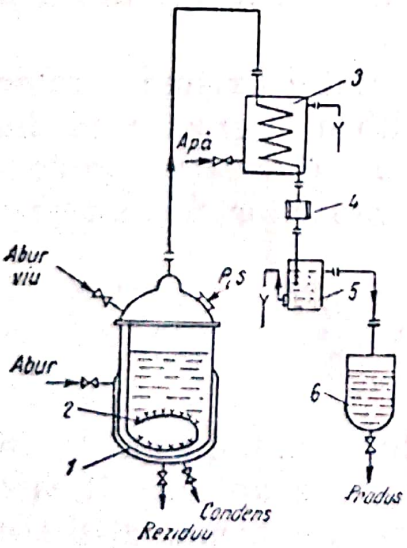

Fig. III.15. Instalație de antrenare cu vapori de apă:
1 — blaz de distilare; *2* — barbotor de abur viu; *3* — răcitor condensator; *4* — vizor; *5* — decantor; *6* — vas colector.

b. **Distilarea** (antrenarea) **cu vapori de apă**

Distilarea cu vapori de apă este folosită pentru separarea unor lichide termolabile sau greu volatile și nemiscibile cu apa (separarea fracțiilor grele din țiței, purificarea anilinei). Se bazează pe proprietatea amestecurilor de lichide nemiscibile de a fierbe la o temperatură mai scăzută decît temperatura de fierbere a fiecărui component în parte. Dacă la un lichid nemiscibil cu apa se adaugă apă, temperatura de fierbere a amestecului rezultat la presiunea atmosferică va fi sub 100°C. În figura III.15 este redată schema unei instalații de distilare cu vapori de apă. Amestecul inițial de lichide se introduce în blazul *1*, unde se încălzește prin cămașa de încălzire, apoi începe barbotarea aburului prin barbotorul *2*. Amestecul de vapori formați trece în

Scanned with OKEN Scanner

răcitorrul-condensator *3*, unde se condensează. Condensatul (amestec nemiscibil de produs+apa) trece în separatorul decantor *5*, unde se separă pe baza diferenței de densitate. Produsul se colectează în vasul colector *6*.

c. **Rectificarea** (fracționarea)

Rectificarea constă dintr-o succesiune de evaporări și condensări realizate în aparate speciale numite *coloane de rectificare*, care au drept rezultat separarea aproape în stare pură a componenților din amestecurile binare de lichide, sau separarea unei fracțiuni înguste (cu număr de componenți reduși) din amestecuri complexe.

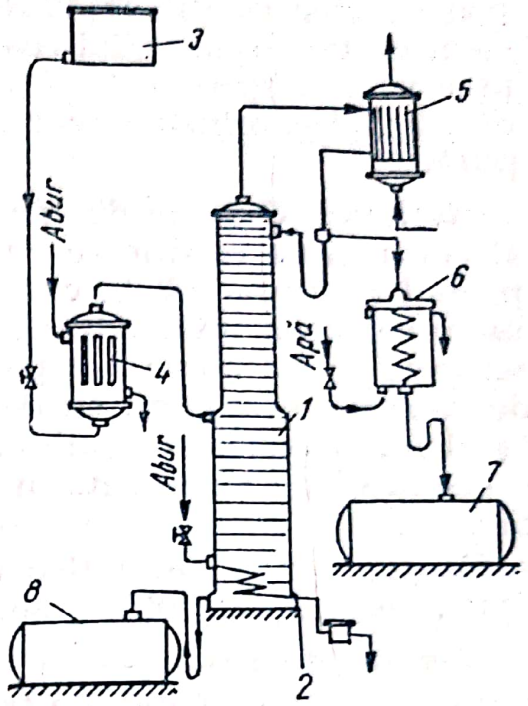

Fig. III.16. Instalație continuă de rectificare:
1 — coloană de rectificare; *2* — fierbător; *3* — rezervor de nivel; *4* — preîncălzitor; *5* — condensator; *6* — răcitor; *7* — rezervor pentru distilat; *8* — rezervor pentru reziduu.

Utilajul principal al instalației de rectificare (fig. III.16) îl constituie coloana de rectificare *1*, care poate fi cu umplutură sau cu talere (ca la absorbție). Amestecul inițial se introduce pe așa numitul taler de alimentare care împarte coloana în două zone: zona de concentrare (zona deasupra talerului de alimentare) și zona de epuizare (zona sub talerul de alimentare).

O coloană de rectificare se poate imagina ca fiind formată dintr-o serie de blaze de distilare cu barbotare directă a vaporilor, pusă una peste alta. În coloana de rectificare, rolul blazelor este îndeplinit de talere.

Fenomenul de pe talere. La rectificarea continuă într-o coloană cu talere, compoziția lichidului de pe un taler nu se schimbă, dar variază de la taler la taler. Începînd de la bază spre vîrful coloanei, lichidul se îmbogățește în component ușor volatil. Deoarece la contractarea lichidului cu vapori, între cele două faze nu există echilibru între compoziție și nici echilibru termic, în timpul barbotării vaporilor (prin stratul de lichid aflat pe taler), o parte din componentul greu volatil trece din faza de vapori în faza lichidă, iar din lichid, o parte din componentul ușor volatil trece în faza de vapori. În felul acesta, vaporii care se ridică de pe taler se îmbogățesc în com-

Scanned with OKEN Scanner

ponent ușor volatil. Dacă coloana de rectificare are un număr suficient de talere, la vîrful coloanei se vor obține vapori de component ușor volatili aproape în starea pură, iar în blazul coloanei, un reziduu lichid cuprinzînd componentul greu volatil în stare tot aproape pură.

Refluxul. O parte din distilat este reintrodus pe talerul superior al coloanei de rectificare cu reflux. Rolul refluxului este dublu. În primul rînd asigură un curent descendent de lichid în coloană, deci un nivel constant de lichid pe fiecare taler, iar în al doilea rînd servește ca un absorbant pentru componentul greu volatil din faza de vapori. În practică, cu debitul de reflux se reglează temperatura la vîrful coloanei de rectificare, ceea ce înseamnă în final, reglarea concentrației componentului ușor volatil în distilat (calitatea distilatului).

Raportul între cantitatea de reflux reintrodus în coloană și cantitatea de distilat obținut se numește *cifra de reflux.*

Bilanțul de materiale și termic al procesului de rectificare. Bilanțul general de materiale este dat de relația:

$$F=D+W, \tag{III-19}$$

iar bilanțul pentru componentul ușor volatil va fi:

$$F\cdot x_F=D\cdot x_D+W\cdot x_W, \tag{III-20}$$

unde:

F este debitul amestecului inițial care intră în coloană, în kmoli/s;
D — debitul de distilat, în kmoli/s;
W — debitul de reziduu de blaz, în kmoli/s;
x_F, x_D și x_W — fracțiile molare ale componentului ușor volatil în amestecul inițial, în distilat și respectiv în reziduul din blaz.

Bilanțul termic al unei coloane de rectificare se bazează pe egalitatea sumei căldurilor intrate în coloană și sumei căldurilor ieșite din coloană și se exprimă prin relația:

$$Q_F+Q_L+Q_a=Q_V+Q_W+Q_c+Q_p, \tag{III-21}$$

unde:

Q_F este căldura intrată în coloană cu amestecul de alimentare;
Q_L — căldura intrată pe la vîrful coloanei de reflux;
Q_a — căldura introdusă în blaz cu aburul de încălzire;
Q_V — căldura ieșită cu vaporii pe la vîrful coloanei;

Scanned with OKEN Scanner

Q_W — căldura evacuată cu reziduul de blaz;
Q_c — căldura evacuată cu condens;
Q_p — pierderi de căldură în mediul înconjurător.

Din ecuația (III-21) se determină cantitatea de abur necesar realizării operației de rectificare.

d. Metode speciale de distilare

Dintre metodele speciale de distilare, mai folosite sînt: distilarea azeotropă, extractivă și moleculară.

Distilarea azeotropă și extractivă constă în adăugarea unui component special care are rolul de a mări volatilitatea componenților de separare. Diferența între distilarea azeotropă și cea extractivă rezultă din modul de acționare a componentului adăugat.

Distilarea azeotropă. În acest caz, componentul adăugat formează un amestec azeotrop cu unul (sau mai mulți) din componenții amestecului cu punct minim de fierbere. Temperatura de fierbere a componentului nou adăugat este de obicei cu 10÷40°C mai mică decît temperaturile de fierbere ale componenților din amestecul inițial.

Aplicațiile industriale ale distilării azeotrope sînt multiple. De exemplu, separarea benzenului și a toluenului din benzină etc. În figura III.17 este reprezentată schema instalației de separare a benzenului din benzină prin distilare azeotropă cu acetonă. Benzina amestecată cu acetona se introduce în coloana de distilare azeotropă, unde se obțin ca distilat, amestecurile azeotrope formate între acetonă și hidrocarburile benzinei, iar ca reziduu de blaz, benzenul aproape pur. Pentru separarea acetonei, distilatul este tratat în coloana de extracție *2* cu apă în care se dizolvă acetona. Din această coloană, prin decantare, rezultă benzina dezaromatizată și soluția de acetonă în apă, care după preîncălzire trece în coloana de distilare *3*, unde ca distilat se obține acetona, care se readuce în coloana de distilare azeotropă. Ca reziduu de blaz se obține apa, care este introdusă după răcire în coloana de extracție.

Distilarea extractivă. În acest caz, componentul nou introdus are rolul de a micșora temperatura de fierbere a componenților din amestecul inițial (uneori are loc chiar inversarea temperaturii de fierbere).

Prin distilarea extractivă se separă amestecuri ca: benzen-ciclohexan (cu furfurol), acid azotic-apă (cu acid sulfuric), butan-butilene (cu acetonă). În figura III.18 este redată schema instalației de separare a benzenului de ciclohexan, prin distilare extractivă cu furfurol. Temperatura de fierbere a benzenului și a ciclohexanului fiind foarte

Scanned with OKEN Scanner

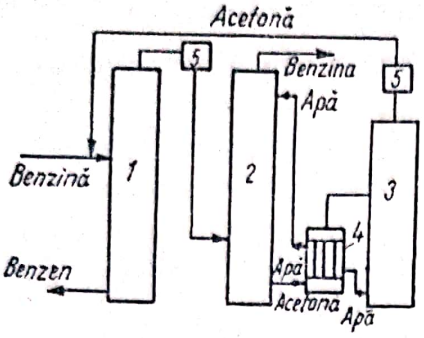

Fig. III.17. Separarea benzenului din benzine pentru distilare azeotropă:
1 — coloană de distilare azeotropă; *2* — coloană de extracție; *3* — coloană de rectificare; *4* — schimbător de căldură; *5* — condensatoare.

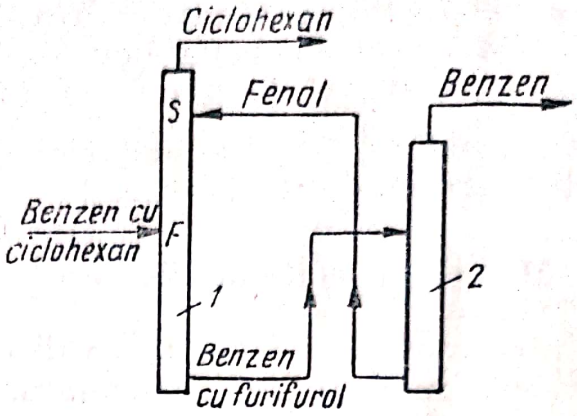

Fig. III.18. Separarea benzenului de ciclohexan prin distilare extractivă:
1 — coloană de distilare extractivă; *2* — coloană de distilare obișnuită.

apropiate (80,1°C și 81,4°C), separarea lor prin rectificare obișnuită este foarte dificilă. Prin adăugare de furfurol, temperaturile de fierbere a benzenului și ciclohexanului se inversează. Prin urmare, în coloana de distilare extractivă se obține ca distilat ciclohexanul, iar ca reziduu de blaz un amestec de benzen și furfurol. Separarea benzenului de furfurol se face prin simpla distilare în coloana 2.

Distilarea moleculară. Această metodă este folosită pentru distilarea lichidelor termolabile sau greu volatile și constă în efectuarea operației de distilare sub vid înaintat (10^{-3} torr), la care moleculele învinge cu ușurință forța de atracție intermoleculară, numărul de ciocniri între molecule scade, iar drumul liber mijlociu parcurs de o moleculă crește foarte repede. Dacă distanța între suprafața de vaporizare și de condensare este mai mică decît drumul liber mijlociu, majoritatea moleculelor care părăsesc suprafața de vaporizare ajung pe suprafața de condensare fără a se ciocni între ele și se condensează. Distanța între suprafața de vaporizare și condensare, este de 20—30 mm, iar diferența de temperatură dintre acestea este de 100°C. Amestecul de separat curge pe suprafața de încălzire sub forma unui film de lichid descendent.

e. Rectificarea amestecurilor multiple

Pentru separarea amestecurilor multiple, dacă diferența temperaturilor de fierbere ale componenților permite, se folosește procesul de rectificare. În acest caz este nevoie de un anumit număr de co-

loane de rectificare, număr care se determină după următoarea formulă:

$$N_{col}=N_k-1, \qquad \text{(III-22)}$$

unde:

N_{col} este numărul necesar de coloane de rectificare;

N_k — numărul componenților din amestec.

Se presupune că există de separat un amestec format din componenții $A+B+C$ care nu formează amestecuri azeotrope. Procesul de separare a acestui amestec prin rectificare poate fi realizat prin două variante (fig. III.19).

În varianta I, în prima coloană se separă ca distilat un amestec de component ușor volatil A și component cu volatilitate medie B, iar în reziduu de blaz se obține componentul greu volatil C. Amestecul $A+B$, după condensare se introduce ca lichid de alimentare în cea de a doua coloană de rectificare, unde se separă componentul ușor volatil ca distilat, iar componentul cu volatilitate medie ca reziduu de blaz.

În varianta a II-a, în prima coloană se separă ca distilat componentul ușor volatil A, iar ca reziduu de blaz se obține un amestec de component cu volatilitate medie B și component greu volatil C, care se trimite cu lichidul de alimentare în cea de a doua coloană de rectificare, unde se obține ca distilat componentul cu volatilitate medie, iar cu reziduu de blaz, componentul greu volatil.

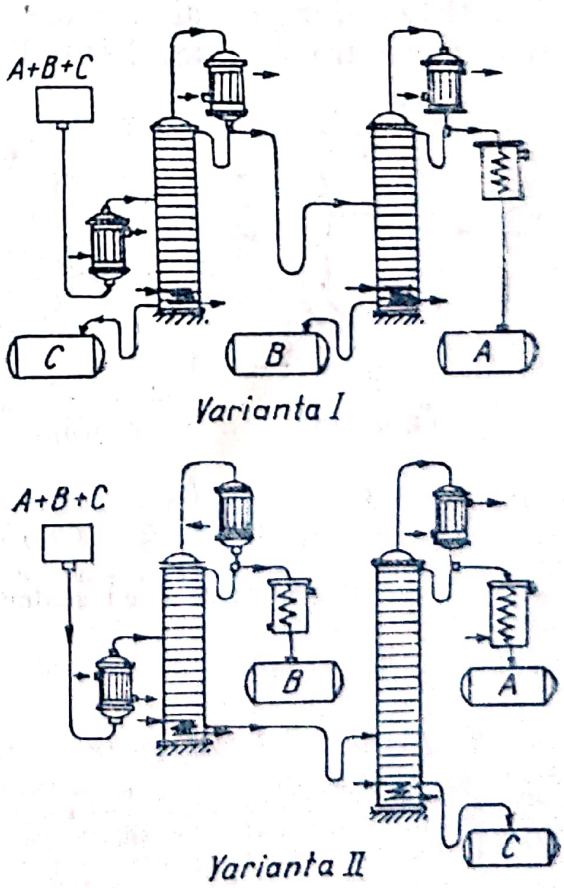

Fig. III.19. Schema instalației de rectificarea amestecurilor ternare.

Scanned with OKEN Scanner

a. Blazele de distilare

Din punct de vedere constructiv, blazele de distilare sînt schimbătoare de căldură în care amestecul lichid supus separării este încălzit pînă la temperatura de fierbere și transformat în vapori. În figura III.20 sînt reprezentate tipurile răspîndite de blaze de distilare. Capacitatea blazelor este determinată de capacitatea instalației și de varianta procesului (continuu sau discontinuu).

b. Coloane de distilare și rectificare

Coloanele de distilare și rectificare se împart în: coloane cu talere și clopoței, coloane cu talere perforate (site), coloane cu umplutură și coloane cu talere de construcții speciale (cu supape, cu elemente în formă de *S* etc.).

Coloane de rectificare cu talere cu clopoței și coloane cu talere perforate. Sînt asemănătoare cu coloanele folosite la absorbție.

Coloane de rectificare cu umplutură (fig. III.21). La aceste coloane funcțiile talerelor și a clopotelor sînt preluate de umplutura care realizează un contact între lichid și vapori, în mod continuu. Con-

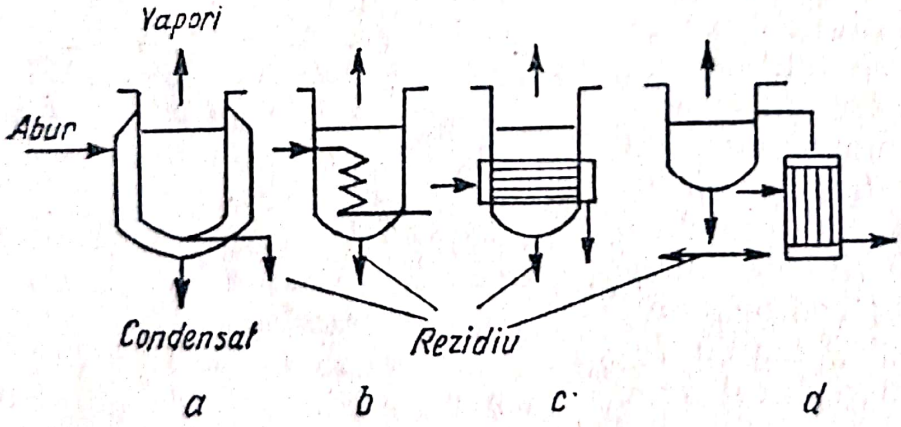

Fig. III.20. Blaze de distilare:
a — cu manta; *b* — cu serpentină; *c* — cu schimbător de căldură tubular orizontal; *d* — cu schimbător de căldură exterior.

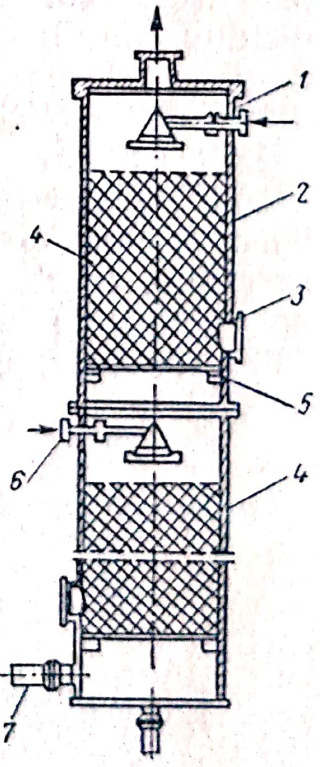

Fig. III.21. Coloană de rectificare cu umplutură:
1 — dispozitiv pentru repartizarea refluxului; *2* — corpul coloanei; *3* — gură de vizitare; *4* — umplutură; *5* — grătar pentru susținerea umpluturii; *6* — dispozitiv pentru repartizarea amestecului de separat; *7* — conducte de legătură cu fierbătorul exterior.

Scanned with OKEN Scanner

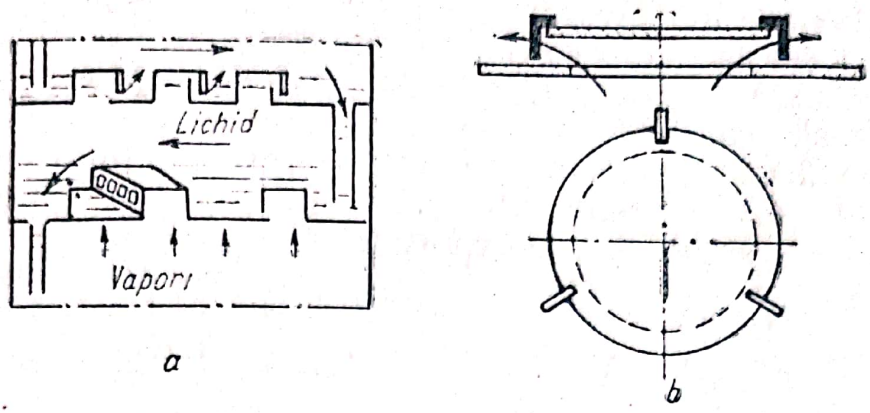

Fig. III.22. Coloane cu talere de construcție specială: *a* — talere cu elemente în formă de S (uniflux); *b* — talere cu supape.

strucția coloanelor cu umplutură este mai simplă decît a coloanelor cu talere. Ele sînt formate dintr-un turn cilindric vertical 2 în interiorul căruia se așază pe grătare, la anumite înălțimi, umplutura de diferite forme 4. Introducerea refluxului la vîrful coloanei și alimentarea coloanei cu amestecul de separat se face prin intermediul unor dispozitive care asigură repartizarea uniformă a lichidului în umplutură.

Coloane cu talere de construcție specială (fig. III.22). Dintre aceste tipuri de coloane mai cunoscute sînt:

— cu talere construite din elemente în formă de *S* (uniflux);
— cu talere cu supape.

D. EXTRACȚIA

1. BAZELE TEORETICE ALE EXTRACȚIEI

Extracția este operația unitară de separare a componenților dintr-un amestec solid sau lichid, pe baza diferenței între solubilitatea acestora într-un solvent selectiv, numit extragent. Dacă amestecul inițial este solid, operația este numită extracția solid-lichid sau dacă amestecul inițial este lichid, operația se numește extracția lichid-lichid.

Se consideră un amestec format din doi componenți $A+B$, componentul B este solubil într-un solvent S, componentul A nu este solubil. În urma punerii în contact a amestecului cu solventul (amestecarea) se vor forma două faze:

Scanned with OKEN Scanner

— faza bogată în solvent, numită *fază de extract*, care conține aproape întreaga cantitate de component B;

— faza săracă în solvent, numită *fază de rafinat* care conține aproape întreaga cantitate de component A.

Cele două faze fiind nemiscibile sau greu miscibile între ele, se separă prin decantare (sedimentare).

Principiul extracției simple este redat prin schema:

$$\underset{\text{amestec inițial}}{(A+B)} \quad \underset{\text{solvent}}{+S} \quad = \quad \underset{\text{faza de extract}}{(B+S)} \quad \underset{\text{faza de rafinat}}{+A}$$

Extractul conține și mici cantități de component A, iar rafinatul mici cantități de component B și solvent S.

2. EXTRACȚIA SOLID-LICHID

Extracția solid-lichid constă în trecerea unui component dintr-un amestec solid în faza lichidă prin intermediul unui solvent selectiv. Substanța extrasă și solventul se separă din sistem ca o fază lichidă (faza de extract), care se supune ulterior unei operații de distilare, obținîndu-se în final componentul B, aproape pur și solventul care este recirculat în sistem.

Pentru a se obține component de puritate avansată, nu este suficientă o singură operație de extracție. Faza de extract rezultată în prima treaptă de extracție este tratată cu o nouă cantitate de solvent. Operația se repetă pînă se obține un produs de puritate dorită.

3. EXTRACȚIA LICHID-LICHID

Extracția lichid-lichid se folosește pentru separarea unor amestecuri omogene de lichide, a căror separare prin distilare sau rectificare este imposibil sau greu de realizat (amestecuri azeotrope, amestecuri de lichide cu temperaturi de fierbere foarte apropiate etc.).

Extracția lichid-lichid constă în punerea în contact a amestecului inițial de lichide cu un solvent selectiv nemiscibil sau greu miscibil cu unul sau cu mai mulți componenți din amestecul inițial. Se obține un sistem format din două faze lichide — faza de extract și faza de rafinat. Datorită tendinței sistemului de a trece în stare de echilibru, componentul solubil va difuza din amestecul inițial spre interfața dintre cele două faze, se va dizolva la suprafața solventului, difuzînd apoi în interiorul acestei faze.

Scanned with OKEN Scanner

Operația de extracție lichid-lichid este redată în figura III.23.

În amestecătorul *1* are loc punerea în contact a amestecului inițial cu solventul. Sistemul format din faza de extract și faza de rafinat se separă în decantorul *2*, după care se recuperează solventul în coloana de distilare sau rectificare *3*.

Unitatea de extracție este formată dintr-un amestecător și un decantor.

Prin extracție, componentul solubil *B*, care urmează să fie separat din amestecul inițial, se distribuie între cele două faze lichide — amestec inițial și solvent — pînă la atingerea echilibrului dinamic. Această repartizare este caracterizată de coeficientul de repartiție K_B, care reprezintă raportul între concentrațiile de echilibru ale componentului distribuit în extract y_B și rafinat x_B la temperatura dată:

$$K_B = \frac{y_B}{x_B}, \qquad \text{(III-23)}$$

unde:

y_B este fracția molară a componentului în faza de extracție la echilibru;

x_B — fracția molară a componentului în faza de rafinat.

Dacă componentul *A* din amestecul inițial de lichide și solventul *S* sînt complet nemiscibili între ei, legea de distribuție (de echilibru) între faza de rafinat și faza de extract are forma:

$$y_B = K_B \cdot x_B, \qquad \text{(III-24)}$$

care într-o diagramă cu coordonatele y_B și x_B se reprezintă printr-o linie dreaptă (fig. III.24).

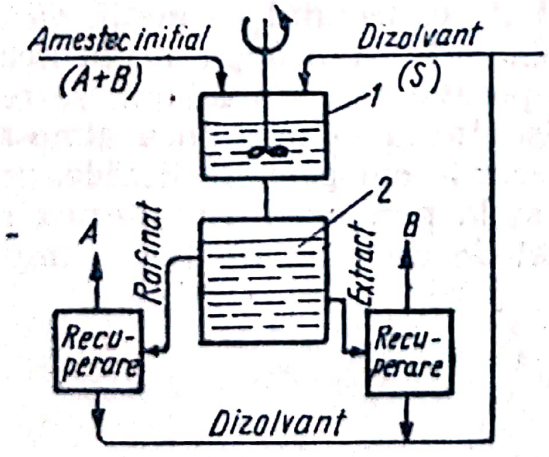

Fig. III.23. Schema de principiu a operației de extracție:
1 — agitator (extractor); 2 — decantor.

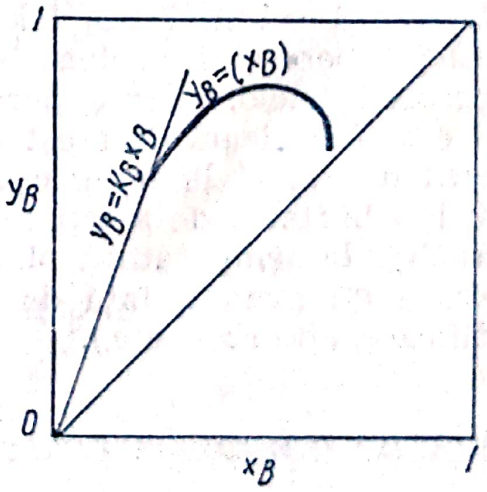

Fig. III.24. Diagrama de echilibru pentru extracție.

Deoarece în realitate componentul A din amestecul inițial de lichide și solventul S sînt parțial miscibili, coeficientul de distribuție depinde de concentrație. Valoarea sa se determină experimental, iar ecuația (III-24) ia forma:

$$y_B = f(x_B \cdot x), \qquad \text{(III-25)}$$

care în diagrama din figura III.24 se reprezintă printr-o linie curbă care intersectează în punctul K, numit *punct critic*. Punctul critic se caracterizează prin egalitatea concentrației componentului B în cele două faze — extractul și rafinatul — $y_B = x_B$ și corespunde miscibilității totale a celor trei componenți (A, B și S).

Procedeele și utilajele de extracție urmăresc creerea unor condiții cît mai aproape de echilibru între cele două faze, astfel încît cea mai mare parte a componentului de extras să treacă în faza de extract, iar faza de rafinat să fie cît se poate de mică.

În cazul extracției lichid-lichid, un rol deosebit îl are solventul. Proprietățile solventului utilizat determină consumurile specifice, procedeul și aparatura de extracție utilizată, procedeul de recuperare a solventului. Solventul trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

— să aibă o selectivitate bună, putere mare de extracție, temperatură de fierbere cît mai scăzută și o căldură de vaporizare cît mai mică, să fie pur, să nu fie inflamabil și corosiv.

Practic, nu se găsesc solvenți care să îndeplinească toate aceste condiții și atunci se aleg solvenți care să răspundă la cît mai multe dintre ele.

Solvenții cei mai des folosiți pentru extracție sînt: benzina de extracție, benzenul, acetona, alcoolul etilic, acetatul de metil, dietilenglicolul, tricloretilena, percloretilena etc. Extracția lichid-lichid deși este favorizată de creșterea temperaturii și a presiunii, se realizează de obicei la temperaturi obișnuite și la presiunea atmosferică. Posibilitatea de a separa amestecurile omogene de lichide, prin extracție, la temperatură obișnuită și la presiunea atmosferică reprezintă un avantaj față de alte metode de separare (de exemplu rectificare, absorbție etc.).

4. PROCEDEE GENERALE DE EXTRACȚIE

În funcție de gradul de separare urmărit, cît și în funcție de debitele de lichid care trebuie prelucrate se pot aplica următoarele procedee generale de extracție:

Scanned with OKEN Scanner

— extracția simplă cu contact unic;
— extracția simplă cu contact multiplu;
— extracția simplă cu contact multiplu în contracurent;
— extracția diferențială în contracurent;
— extracția cu doi solvenți.

Extracția simplă cu contact unic constă în punerea în contact a amestecului inițial A și a solventului S într-un amestecător. După amestecare, lichidul este trecut într-un decantor unde pe baza diferenței de densitate se separă faza de extract E de faza de rafinat R. Acest procedeu este mai rar folosit, deoarece are o eficacitate slabă de extracție și necesită un consum mare de solvent.

Extracția simplă cu contact multiplu (fig. III.25) este o repetare a procedeului de extracție simplă cu contact unic. Rafinatul obținut în prima unitate de extracție R_1 este tratat în continuare cu solvent proaspăt pînă la îndepărtarea cît mai înaintată a componentului B din rafinat. Acest procedeu se folosește cînd se urmărește puritatea ridicată a rafinatului final. Dezavantajul constă în consumul relativ mare de solvent și concentrația mică a componentului B în faza de extract.

Extracția cu contact multiplu în contracurent (fig. III.26). Acest procedeu asigură un grad înalt de separare, cu un consum scăzut de solvent, prin aplicarea principiului contracurentului între amestecul inițial și solvent. În primul extractor *1* se introduce amestecul ini-

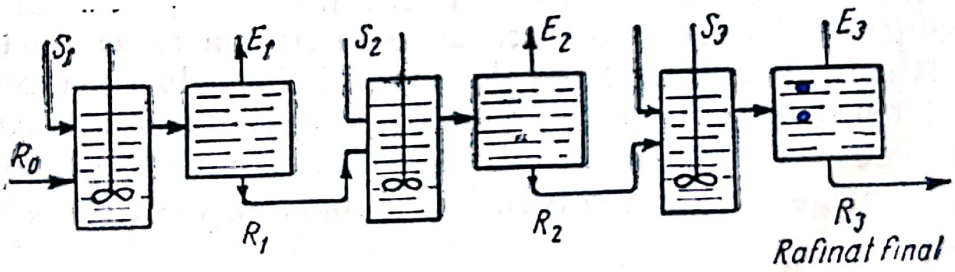

Fig. III.25. Extracția simplă cu contact multiplu.

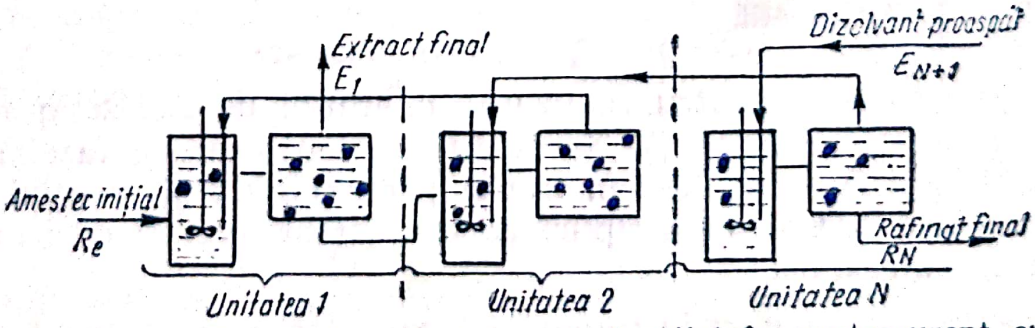

Fig. III.26. Schema de principiu a extracției în contracurent cu contact multiplu.

Scanned with OKEN Scanner

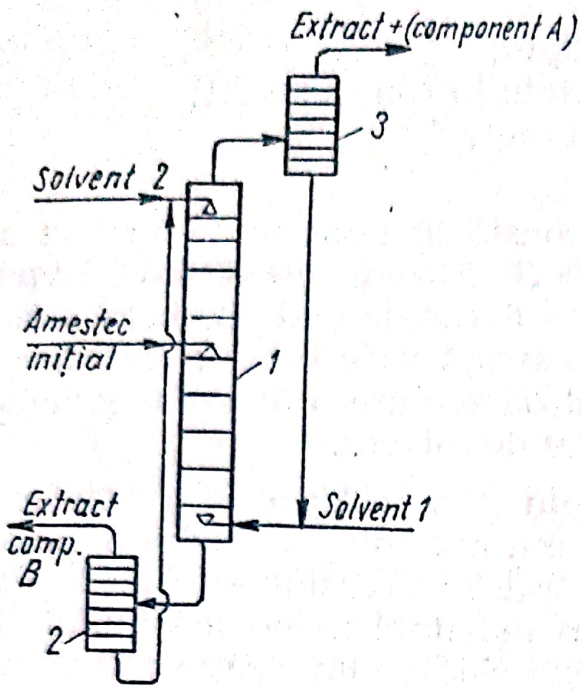

Fig. III.27. Instalație de extracție cu doi solvenți:
1 — coloană de extracție; 2, 3 — coloană de rectificare.

țial, iar în ultimul extractor *3*, solventul. Astfel solventul proaspăt întîlnește rafinatul aproape epuizat, din care extrage ultimele cantități de component *B*. Cînd extractul ajunge în extractorul *1*, îmbogățit din extractoarele *2* și *3*, întîlnind amestecul inițial proaspăt din care mai dizolvă componenta *B*, ajunge în stare aproape de saturație.

În cazurile în care faza de extract obținut trebuie să aibă o concentrație cît mai mare în component *B*, procedeul de extracție cu contact multiplu în contracurent se îmbunătățește prin introducerea unui reflux de extract sau de rafinat.

Extracția cu doi solvenți (fig. III.27). Această metodă este utilizată atunci cînd se cere îmbunătățirea selectivității solventului. În acest caz, ambele produse obținute reprezintă extracte conținînd cei doi componenți *A* și *B* din amestecul inițial.

Unul dintre solvenți S_1 se introduce în partea de sus a coloanei, iar celălalt solvent S_2 în partea de jos. Cei doi solvenți circulă prin coloană în contracurent, pe baza diferenței de densitate. Avantajul acestui procedeu constă în faptul că se obține un grad mare de separare, însă alegerea a doi solvenți cu proprietăți cerute este destul de dificilă.

5. TIPURI DE EXTRACTOARE

Utilajele folosite pentru realizarea operației de extracție se numesc *extractoare*. În funcție de modul de contactare a fazelor, extractoarele pot fi cu contact în trepte și cu contact diferențial.

Fiecare din aceste două tipuri de extractoare pot fi cu sau fără amestecare mecanică.

Extractoare cu contact în trepte. În cazul acestor extractoare, amestecarea și separarea fazelor se face în trepte distincte. Extractoarele

Scanned with OKEN Scanner

din această categorie fără amestecare mecanică se aseamănă cu coloanele de absorbție sau de rectificare. Contactul dintre cele două faze este intensificat cu ajutorul paletelor, elicelor, agitatoarelor tip turbină montate pe un arbore central rotativ.

— *Extractorul cu talere sită* (fig. III.28, *a*) are forma unei coloane în care sînt montate mai multe talere perforate (site). Lichidul greu (amestecul inițial) se introduce la vîrful coloanei, lichidul ușor (solventul) la bază, iar fazele ce rezultă în urma extracției se scot prin cotele opuse.

— *Extractorul cu agitare și umplutură* (fig. III.28, *b*) este format dintr-un corp cilindric vertical, prevăzut cu un arbore central pe care sînt montate amestecătoare cu două palete. Prin rotirea arborelui, paletele amestecă cele două faze în zone limitate. Între zonele de amestecare sînt dispuse tronsoane cu umplutură, în care se face separarea fazelor prin decantare.

Acest tip de extractor are o construcție simplă și o eficacitate mare.

Extractoare cu contact diferențial. Circulația celor două lichide este în contracurent, separarea făcîndu-se datorită diferenței de densitate. Aceste extractoare ca și extractoarele cu contact în trepte pot fi cu sau fără amestecare mecanică.

— *Coloana cu pulverizarea fazei disperse* (fig. III.29) are cea mai simplă construcție. Ea se compune dintr-un turn gol în interior *1*, care se umple cu lichid greu introdus în partea superioară prin racordul *2*. Lichidul ușor se introduce pe la baza coloanei prin racordul *3*, fiind pulverizat cu ajutorul dispozitivului de pulverizare *4*. Coloana este prevăzută la ambele capete cu zone de decantare *5*.

— *Coloana de extracție cu pulsație* (fig. III.30) elimină dezavantajul coloanelor cu talere sau cu umplutură care constă în formarea straturilor staționare de lichid greu sau ușor, pe talere sau

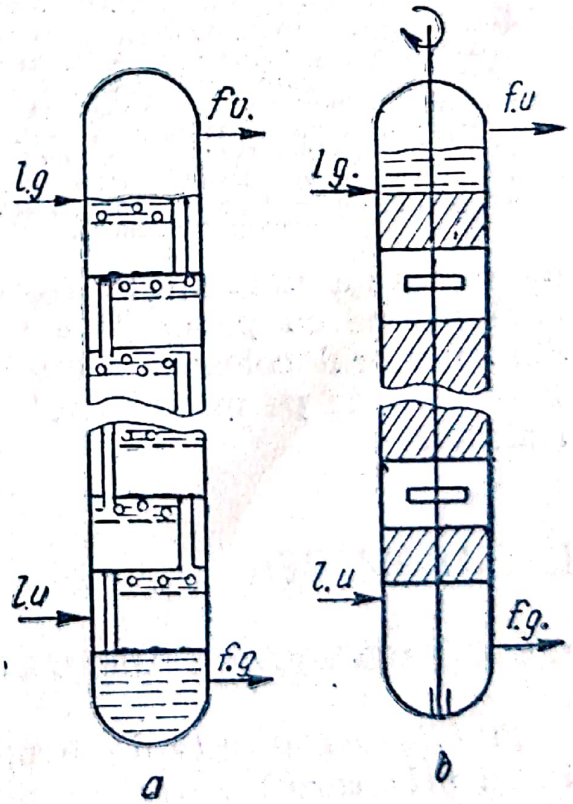

Fig. III.28. Extractoare cu contact în trepte.
a — extractor cu talere sită; *b* — extractor ca agitare și umplutură.

Scanned with OKEN Scanner

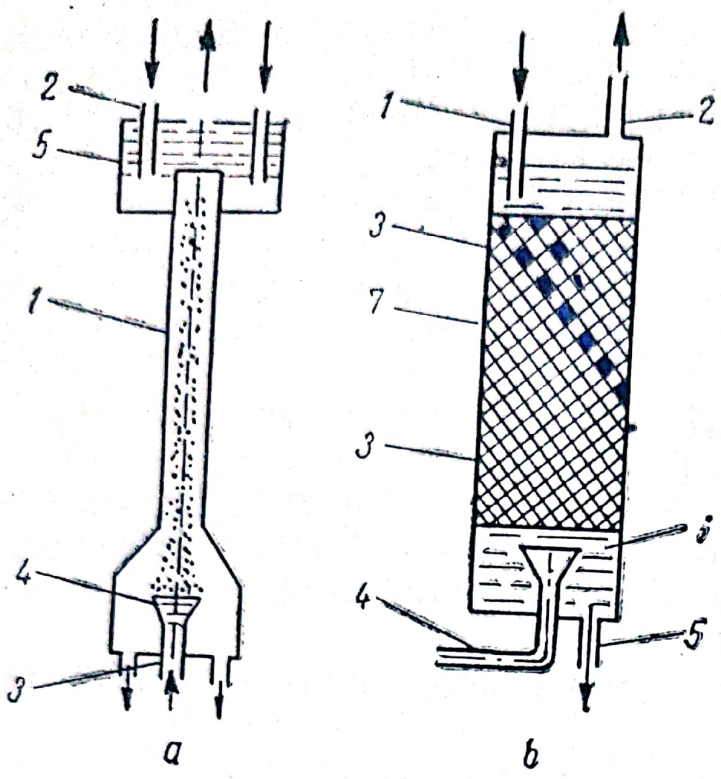

Fig. III.29. Extractoare cu contact diferențial fără amestecare mecanică:
a — coloană cu pulverizarea fazei disperse; *1* — corpul coloanei; *2* — intrare în lichid greu; *3* — intrare lichid ușor; *4* — dispozitiv de pulverizare; *5* — zonă de decantare; *b* — coloană cu umplutură; *1* — intrare lichid greu; *2* — ieșirea fazei de extract; *3* — umplutură; *4* — intrare lichid ușor; *5* — ieșirea fazei de rafinat; *6* — dispozitiv de pulverizare; *7* — corpul coloanei.

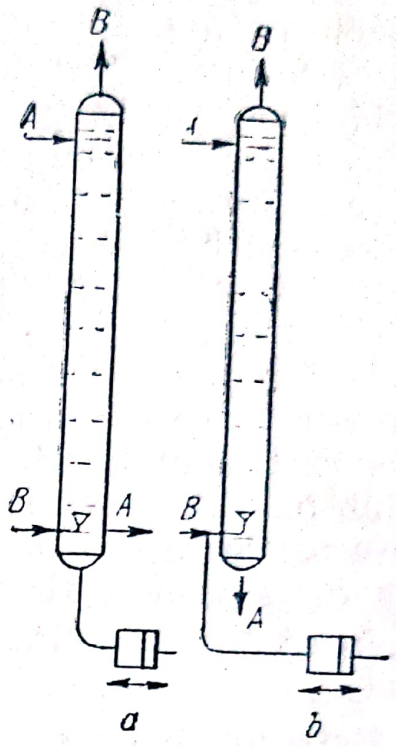

Fig. III.30. Coloană de extracție cu pulsație:
A — lichid greu; *B* — lichid ușor.

pe suprafața umpluturii. Aceste lucruri se realizează cu ajutorul unei pompe cu piston fără supape care imprimă masei de lichid din interiorul coloanei o mișcare de dute-vino (cu o frecvență de 1—2 pulsație pe minut). Aceste extractoare au o eficacitate foarte ridicată.

E. FLUIDIZAREA

1. BAZELE TEORETICE ALE FLUIDIZĂRII

Fluidizarea nu este o operație unitară, ci reprezintă o tehnică de lucru prin care un strat granular sau pulverulent este adus într-o stare de continuă agitare într-un curent de fluid cu viteză determinată. Sistemul fluid-solid format — stratul fluidizat — capătă proprietățile unui fluid adevărat.

Pentru a înțelege principiile fluidizării se face următoarea experiență: într-un tub de sticlă de formă conică prevăzut cu o placă poroasă se introduce materialul granular care se dispune deasupra plăcii sub forma unui strat cu înălțimea h_o (fig. III.31). Prin partea inferioară a tubului se introduce un curent de gaz (agent de fluidizare).

La viteze mici, gazul se strecoară printre granulele stratului fără a le deplasa (h_o=constant), stratul rămîne fix (fig. III.31, *a*). Crescînd viteza gazului, stratul crește în înălțime pînă la o anumită viteză a gazului, cînd forța de frecare între gaz și granule devine egală cu greutatea granulei. Începînd cu această viteză, numită *viteză inițială de fluidizare* (W_{fi}), particulele solide nu se mai sprijină una pe alta ci sînt susținute de curentul de gaz. Stratul fix trece în strat fluidizat (fig. III.31, *b*). La creșterea vitezei peste o anumită limită superioară, numită *viteză finală de fluidizare* (W_{ff}) sau viteză critică de antrenare, granulele sînt antrenate în curentul de gaz, creîndu-se condiții pentru transportul pneumatic (fig. III.31, *c*).

La trecerea gazului prin stratul granular, datorită frecărilor, au loc pierderi de presiune (Δp) care vor depinde de viteza gazului. Această dependență este reprezentată într-o diagramă (fig. III.32). După cum se vede din diagramă, la început, pierderile de presiune sînt direct proporționale cu viteza gazului (zona stratului fix). În momentul cînd viteza gazului devine egală cu viteza inițială de fluidizare (W_{fi}), pierderile de presiune devin practic constante (zona stratului fluidizat) pînă cînd viteza gazului nu ajunge la viteza finală de fluidizare (W_{ff}), după care începe fenomenul de transport pneumatic.

Aceleași fenomene se observă, în ansamblu, și în cazul cînd agentul de fluidizare este lichid.

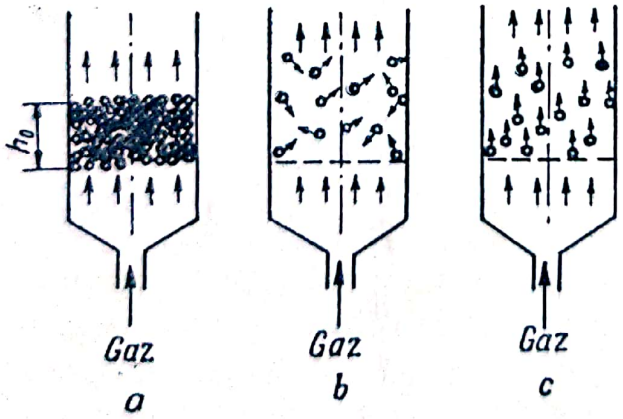

Fig. III.31. Schema de principiu a fluidizării:
a — strat fix; *b* — strat fludizat; *c* — transport pneumatic.

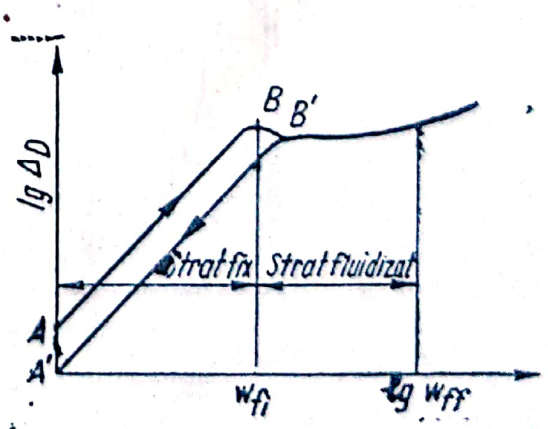

Fig. III.32. Variația pierderii de presiune în funcție de viteza gazului.

Scanned with OKEN Scanner

Avantajele fluidizării sînt: amestecare intensă și transport comod al pulberii, suprafață mare de contact între fluid și solid, coeficienți mari de transfer de căldură și masă, posibilitatea automatizării instalațiilor cu strat granular.

Cu toate avantajele fluidizării (stratului fluidizat), ea are și o serie de inconveniente ca: sfărîmarea particulelor solide prin frecare, eroziunea suprafeței utilajelor, consum mare de energie pentru transportul agentului de fluidizare și pentru mărunțirea solidului.

2. UTILAJE PENTRU FLUIDIZARE

Utilajele pentru fluidizare se clasifică în:

— utilaje cu un singur strat fluidizat;
— utilaje cu mai multe straturi etajate;
— utilaje de fluidizare cu recircularea fazei solide (pulberi).

Fiecare din cele trei tipuri de utilaje principale se realizează într-o mare varietate de construcții, specifice operațiilor care se desfășoară în strat fluidizat.

Utilaje cu un singur strat fluidizat (fig. III.33). Aceste aparate sînt formate, de obicei, dintr-un recipient cilindric *1* (căptușit cu

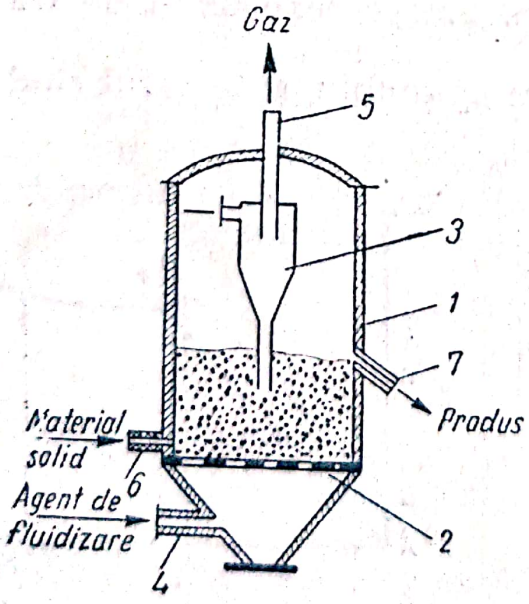

Fig. III.33. Aparat cu un singur strat fluidizat.

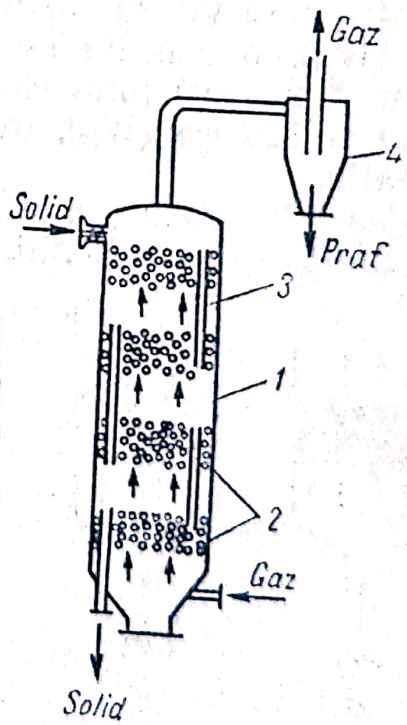

Fig. III.34. Utilaj pentru fluidizare cu mai multe straturi etajate.

cărămizi refractare cînd se lucrează la temperaturi mari), prevăzut în partea de jos cu un grătar *2* pe care se așază materialul solid granulat și care are rolul de a repartiza uniform agentul de fluidizare în strat. Aparatul este prevăzut cu deschideri pentru intrarea și ieșirea agentului de fluidizare *4* și *5*, pentru alimentare cu material solid *6* și eliminarea particulelor din aparat. Pentru separarea pulberii antrenate de gaz, se folosesc cicloane *3* sau filtre cu saci. Aceste aparate pot funcționa periodic sau continuu.

Utilaje cu mai multe straturi etajate (fig. III.34). Acestea sînt de tip coloane, asemănătoare cu coloanele de absorbție sau de rectificare cu talere perforate și cu tuburi deversoare. Ele sînt formate dintr-o coloană cilindrică *1* prevăzută cu mai multe grătare *2*, pe care se găsește materialul solid pulverulent și care constituie un etaj (talere). Trecerea pulberii de pe un etaj pe altul, se realizează cu ajutorul deversoarelor *3*. Circulația se realizează în contracurent cu agentul de fluidizare; pe fiecare etaj se formează stratul fluidizat. La ieșirea gazului din aparat se găsesc unul sau mai multe cicloane *4*.

Utilaje cu recircularea pulberii. Problema recirculării pulberii se pune atunci cînd, pulberea îndeplinește rolul de purtător de căldură sau de catalizator pentru realizarea unor reacții catalitice (cracarea catalitică a produselor petroliere). În acest ultim caz este necesară regenerarea catalizatorului, care se realizează tot în strat fluidizat. Circulația catalizatorului între reactor și regenerator se realizează, în cele mai multe cazuri, prin transport pneumatic.

F. ADSORBȚIA

1. BAZELE TEORETICE ALE ADSORBȚIEI

Adsorbția este operația de separare a unui component (sau a mai multor componenți) dintr-un amestec omogen gazos sau lichid, prin reținerea, pe suprafața unui material poros solid, numit adsorbant. Operația inversă adsorbției se numește *desorbția.*

Datorită proprietăților selective ale materialelor adsorbante față de un anumit component, operația de absorbție se poate aplica industrial în procese tehnologice de separare, recuperare și purificare. De asemenea, adsorbția se mai folosește la uscarea gazelor, la purificarea apei, în măștile de protecție contra gazelor toxice etc.

Scanned with OKEN Scanner

În procesul de adsorbție, moleculele componentului de separat sînt reținute pe suprafața materialului poros adsorbant sub influența forțelor de atracție moleculară. Acest fenomen este însoțit uneori de difuziunea substanței adsorbite în interiorul materialului solid adsorbant, de condensarea capilară a acestuia sau chiar de reacții chimice între componentul adsorbit și materialul poros adsorbant. În acest caz, procesul se numește *chemosorbție*.

Indiferent de natura forțelor care participă la adsorbție, după un timp de contact, la temperatură constantă, între componentul de adsorbit și materialul adsorbant, se stabilește un echilibru dinamic, care se manifestă prin constanța concentrațiilor componentului adsorbit în cele două faze aflate în contact. Procesul de adsorbție are loc cu o viteză cu atît mai mare cu cît concentrația componentului de adsorbit în amestecul gazos sau lichid supus separării este mai mare decît concentrația corespunzătoare echilibrului dintre cele două faze.

Factorii care influențează procesul de adsorbție sînt:

— natura componentului de adsorbit și al materialului poros adsorbant;

— compoziția fazei gazoase sau lichide;

— temperatura și presiunea la care are loc procesul.

Materialele adsorbante folosite sînt: cărbunele activ, care se obține prin activarea mangalului de lemn de fag cu abur, gelul de silice (sau silicagel), obținut din silicat de sodiu prin tratare cu acizi minerali, pămînturile decolorante (folosite mai mult pentru adsorbția lichidelor), alumină activată. O importanță deosebită o au sitele moleculare (zeoliți), care datorită porozității uniforme și dimensiunilor mici a porilor au o selectivitate foarte ridicată.

Zeoliții sînt silicați de aluminiu cristalini ai metalelor alcaline. Prin deshidratare, în cristalele zeoliților se formează cavități în care nu au acces decît moleculele de o anumită formă și dimensiune; astfel sitele moleculare prezintă și o selectivitate geometrică.

2. PROCEDEE DE ADSORBȚIE

În funcție de modul de contactare a celor două faze, se deosebesc următoarele procedee de adsorbție: statică, dinamică, continuă, hipersorbție.

Adsorbția statică se folosește pentru purificarea lichidelor (rafinarea uleiurilor cu pămînt decolorant, declorurarea apelor care conțin clor activ cu cărbunele activ etc.) și se realizează prin introduce-

Scanned with OKEN Scanner

rea materialului poros adsorbant sub formă de praf sau granule fine în lichidul de separat aflat în stare de agitare. După terminarea adsorbției, materialul adsorbant este lăsat să sedimenteze, se separă prin filtrare și dacă este necesar se regenerează.

Adsorbția dinamică se folosește pentru adsorbția gazelor (uscarea aerului, reținerea gazelor toxice prin cartușul filtrant al măștilor de gaze etc.) și se realizează prin trecerea continuă a amestecului gazos de separat printr-un strat de material adsorbant granular. Ea cuprinde trei etape mai importante: adsorbția propriu-zisă, desorbția componentului adsorbit (regenerarea materialului adsorbant) și răcirea lui.

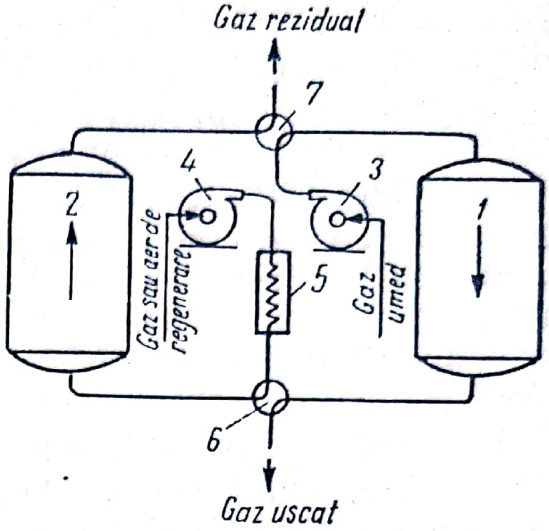

Fig. III.35. Instalație de adsorbție cu două adsorbere:

1 — adsorber în adsorbție; *2* — adsorber în regenerare; *3* — ventilator de gaz umed; *4* — ventilator pentru gaz sau aer pentru regenerare; *5* — încălzitor; *6*, *7* — robinete cu căi.

În figura III.35 este reprezentată schema unei instalații cu două adsorbere cu funcționarea pseudo-continuă pentru realizarea adsorbției dinamice, utilizate pentru uscarea aerului cu silicagel.

Adsorberul *1* se găsește în etapa de adsorbție a vaporilor de apă din aerul umed de către silicagel; adsorberul *2* se găsește în fază de desorbție și regenerare cu ajutorul aerului cald cu temperatura de 200—250°C. După răcirea stratului de silicagel, adsorberul *2* trece în etapa de adsorbție, iar adsorberul *1* la etapa de regenerare și răcire. În felul acesta, deși fiecare adsorber luat separat funcționează discontinuu, instalația luată în întregime funcționează continuu.

Adsorbția continuă. Caracteristica principală a acestui procedeu de adsorbție constă în aceea că atît materialul solid adsorbant cît și amestecul separat gazos sau lichid, se află în continuă mișcare. Procedeul de adsorbție continuă se folosește la purificarea gazelor, la tratarea lichidelor cu schimbători de ioni etc. El se realizează în adsorbere cu strat mobil, sau cu strat fluidizat de material adsorbant.

În figura III.36 este prezentată schița unei instalații de adsorbție continuă în strat fluidizat. Ca agent de fluidizare este folosit chiar amestecul gazos care urmează să fie separat. Adsorbantul regenerat într-un desorber *2* tot în strat fluidizat este transportat pneumatic cu ajutorul componenților desorbiți la partea superioară într-un separator gaz solid *5*, unde are loc separarea fazei gazoase de mate-

Scanned with OKEN Scanner

rialul adsorbant solid. Materialul adsorbant regenerat trece mai departe prin cădere liberă într-un răcitor *3*, de unde este reintrodus din nou în adsorberul cu strat fluidizat *1*.

În ultimul timp, adsorbția continuă se realizează în utilaje tip coloană cu talere în regim de strat fluidizat.

Hipersorbția (rectisorbția) este o variantă perfecționată a adsorbției continue, care se folosește la separarea amestecurilor de gaze sau de vapori în componentele lor pure, datorită combinării procesului de adsorbție cu rectificarea componenților adsorbiți. De exemplu: separarea etilenei și acetilenei, separarea azotului din gaze naturale etc.

Procesul de hipersorbție se realizează într-un aparat de construcție specială, numit *coloană de hipersorbție* (fig. III.37). În această coloană materialul adsorbant (în cazul dat, cărbunele activ) circulă continuu în sens descendent, trecînd succesiv zona de răcire *2*, prin

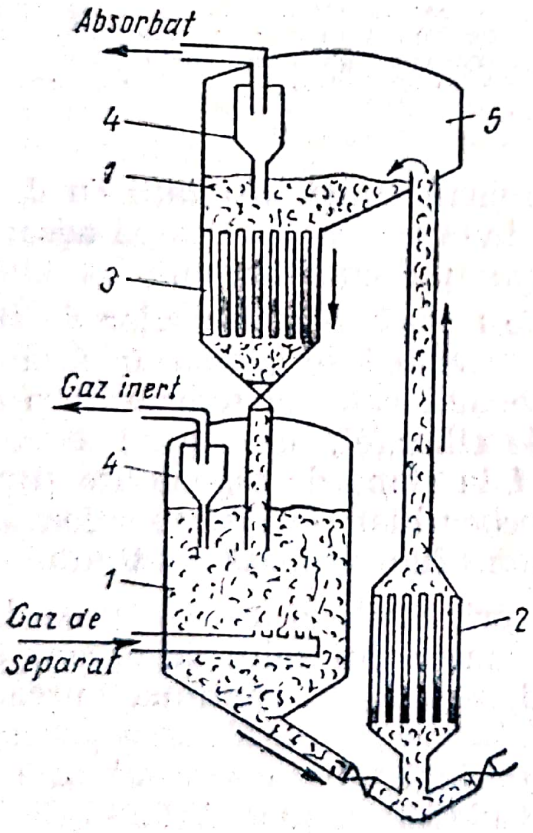

Fig. III.36. Instalație de adsorbție continuă în strat fluidizat:
1 — adsorber; *2* — desorber; *3* — răcitor; *4* — cicloane; *5* — separator de gaz solid.

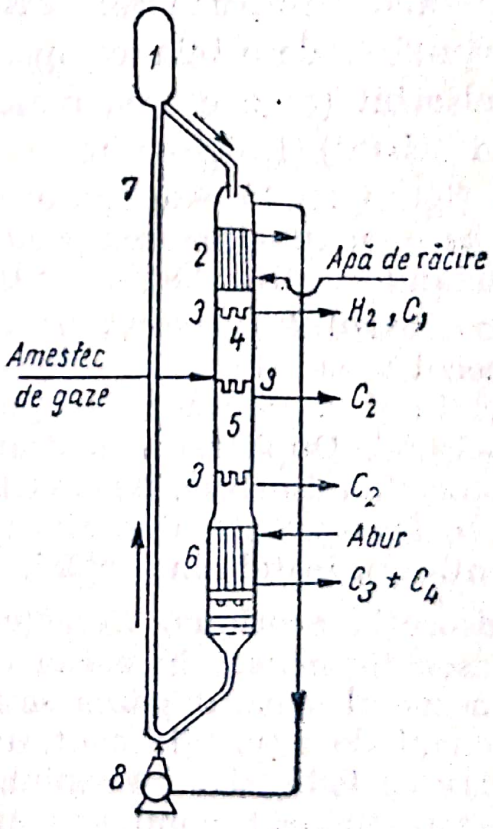

Fig. III.37. Coloană de hipersorbție:
1 — buncăr de alimentare; *2* — zonă de răcire; *3* — grătare de distribuire; *4* — zonă de adsorbție; *5* — zonă de rectificare; *6* — zonă de desorbție; *7* — elevator pneumatic; *8* — turbocompresor.

Scanned with OKEN Scanner

grătare de repartizare *3*, prin zona de adsorbție *4*, zona de fracționare *5* și de desorbție *6*, prin care este trimis prin conducta de transport pneumatic *7* înapoi în buncărul de alimentare *1*. Amestecul de gaze (hidrogen, metan, etilenă și alte hidrocarburi gazoase) intră în coloană în dreptul unui grătar printr-o conductă de alimentare și întîlnește în contracurent cărbunele actitv. Componenții mai grei (C_2, C_3, C_4) sînt adsorbiți, iar componenții ușori (H_2 și C_1) rămîn neadsorbiți și se evacuează pe la vîrful coloanei. Sub talerul de alimentare se găsește zona de rectificare în care temperatura crește de sus în jos. Întîi are loc desorbția fracției C_2 care se evacuează din coloană printr-un ștuț lateral. Cărbunele activ saturat în componenți mai grei (C_3, C_4) trece în zona încălzitorului *6*, în care se introduce și abur direct. Hidrocarburile respective se desorb și se evacuează împreună cu aburul introdus, separîndu-se de acestea prin decantare după condensarea prealabilă a lor.

G. CRISTALIZAREA

1. BAZELE TEORETICE ALE CRISTALIZĂRII

Cristalizarea este operația unitară de separare a unei substanțe solide din soluția sa suprasaturată, sau prin solidificare din topituri. Procesul invers cristalizării este procesul de dizolvare a substanțelor solide într-un solvent lichid.

Soluția care conține la aceeași temperatură o cantitate de substanță dizolvată mai mare decît cea corespunzătoare solubilității sale în lichidul respectiv, se numește *soluție suprasaturată*. Soluția suprasaturată este instabilă; substanța dizolvată care depășește concentrația de saturație se cristalizează, soluția devenind din nou saturată. Soluția saturată rămasă după separarea cristalelor se numește *soluție mamă*.

Procesul de cristalizare are două faze distincte formarea și creșterea cristalelor.

Formarea cristalelor poate avea loc în urma apariției spontane a unor germeni (centre) de cristalizare, în acele puncte ale soluției unde concentrația substanței dizolvate este maximă, sau se produce în urma introducerii în soluția suprasaturată a unor cristale mici din substanța respectivă, numite *centre de amorsare*.

Existența unui număr mic de germeni de cristalizare în unitatea de volum a soluției, conduce la formarea de cristale mari. Formarea cristalelor mari este favorizată și de răcirea lentă a soluției și

Scanned with OKEN Scanner

de lipsa de agitare a ei în timpul procesului de cristalizare. Agitarea intensă și răcirea rapidă a soluției suprasaturate cu o concentrație ridicată în substanța dizolvată, duce la formarea unui număr mare de germeni de cristalizare și implicit la obținerea cristalelor de dimensiuni mici.

Cristalizarea are loc cu degajare de căldură, numită *căldură de cristalizare*. Ea este egală cu căldura absorbită în timpul dizolvării substanței solide respective.

Operația de cristalizare decurge în trei etape principale: obținerea soluției suprasaturate, cristalizarea propriu-zisă și separarea cristalelor formate din soluția mamă (de obicei prin filtrare sau centrifugare).

Pentru realizarea operației de cristalizare se aplică următoarele procedee de obținere a soluției suprasaturate:

— Răcirea soluției, la cristalizarea substanțelor a căror solubilitate depinde mult de temperatură și la cristalizarea topiturilor.

— Îndepărtarea parțială a solventului în cazul cristalizării substanțelor a căror solubilitate este slab influențată de temperatură; îndepărtarea se realizează prin evaporarea acestuia sub vid.

— Evaporarea parțială a solventului, însoțită de răcirea soluției (procedeul combinat).

Bilanțul de materiale ale procesului de cristalizare este:

$$S_1 = S_m + K + W, \qquad \text{(III-25)}$$

unde:

S_1 este cantitatea de soluție inițială, în kg/s;
K — cantitatea de cristale obținute, în kg/s;
W — cantitatea de vapori îndepărtați, în kg/s;
S_m — cantitatea de soluție mamă, în kg/s.

Bilanțul parțial de materiale este:

$$S_i \cdot C_i = S_m \cdot C_m + K \cdot c_K,$$

unde:

C_i este concentrația inițială a substanței dizolvante;
c_K — concentrația substanței de separat în cristale.

2. TIPURI PRINCIPALE DE CRISTALIZATOARE

În funcție de modul de obținere a soluției, cristalizatoarele se clasifică în: cristalizatoare cu răcire, cu îndepărtarea parțială a solventului, cristalizare sub vid.

Scanned with OKEN Scanner

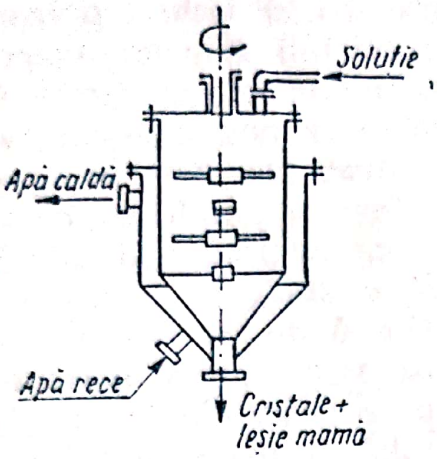

Fig. III.38. Cristalizator cu manta de răcire.

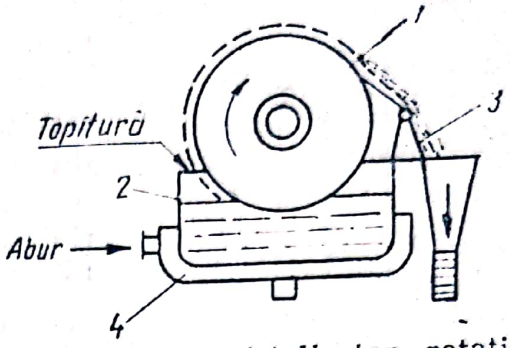

Fig. III.39. Cristalizator rotativ cu răcirea interioară:
1 — tambur rotativ; *2* — cuvă cu topitură; *3* — cuțit de îndepărtare a solzilor; *4* — manta de încălzire cu abur.

Cristalizatoare cu răcire. Răcirea soluției în aceste cristalizatoare se face prin manta sau prin serpentine interioare, de obicei, cu ajutorul apei. Unele dintre aceste tipuri de cristalizatoare sînt prevăzute cu răcitor exterior prin care soluția circulă în circuit închis între răcitor și cristalizator.

În figura III.38 este reprezentată schița unui cristalizator cu răcire prin manta. Aceste aparate pot funcționa periodic sau continuu. Pentru funcționarea continuă se leagă în serie mai multe cristalizatoare pe care soluția le parcurge succesiv în contracurent cu apa de răcire.

Pentru cristalizatoare din topituri se folosesc cristalizatoare rotative cu răcire interioară (fig. III.39).

Cristalizatoare cu îndepărtarea parțială a solventului. În aceste cristalizatoare, o parte din solvent este eliminat prin fierberea soluției care se concentrează depunînd cristale pe fundul vasului. Cristalele formate sînt eliminate intermitent cu soluția mamă și separate prin filtrare sau centrifugare.

Cristalizatoare cu evaporare sub vid. Folosirea vidului în operația de cristalizare are drept scop coborîrea temperaturii de fierbere a soluției și prin urmare și a temperaturii de cristalizare.

În cazul cristalizatoarelor sub vid are loc evaporarea a circa 10% din solvent, iar rolul principal în realizarea suprasaturației îl are răcirea soluției datorită evaporării adiabatice.

Scanned with OKEN Scanner

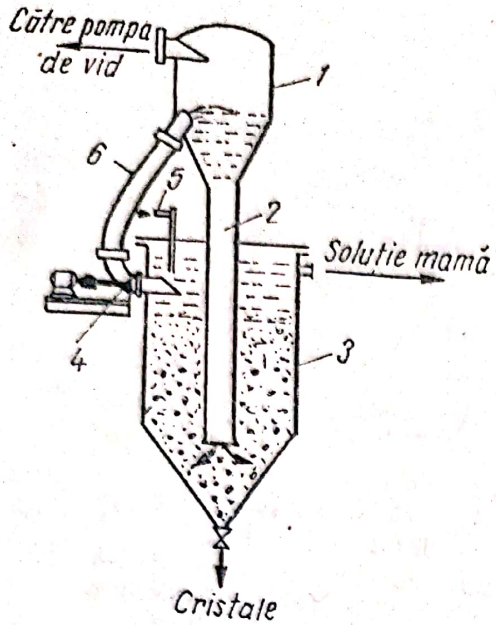

Fig. III.40. Cristalizator cu evaporare în vid:
1 — evaporator; 2 — conductă barometrică; 3 — vas de cristalizare; 4 — pompă de recirculație; 5 — alimentarea soluției; 6 — conductă de recirculație.

În figura III.40 este prezentată schița unui cristalizator cu evaporare sub vid cu funcționare continuă. Cristalizatorul este format dintr-un evaporator situat deasupra vasului de cristalizare de formă cilindrică, prevăzut cu fund conic. Evaporatorul este legat de vasul de cristalizare printr-o conductă exterioară de circulație a soluției și printr-o conductă barometrică interioară care pătrunde în soluția de cristalizat pînă aproape de partea conică a vasului de cristalizare.

Soluția alimentată în vasul de cristalizare este pompată împreună cu o parte din soluția mamă în evaporator, de unde soluția suprasaturată ca urmare a evaporării și răcirii, coboară prin conducta barometrică în vasul de cristalizare. Aici, cristalele formate se sedimentează și sînt evacuate pe la partea inferioară a cristalizatorului. Soluția mamă, care deversează în partea superioară a cristalizatorului se evacuează cu o pompă. Vidul necesar evaporării este creat cu ajutorul unei pompe de vid sau cu o baterie de ejectoare. Cristalizarea sub vid se poate realiza în instalații, cu mai multe cristalizatoare legate în serie.

H. SUBLIMAREA

1. BAZELE TEORETICE ALE SUBLIMĂRII

Sublimarea este operația unitară de separare și purificare a substanțelor solide, prin trecerea substanței din fază solidă direct în fază de vapori și condensarea ulterioară a vaporilor formați. Trecerea vaporilor în faza solidă se numește *desublimare*. Produsul obținut în urma operației de sublimare-desublimare se numește *sublimat*.

Operația de sublimare este folosită în industria chimică pentru purificarea unor substanțe solide ca: iodul, sulful, fosforul, camforul, acidul salicilic, acidul benzoic, clorura de aluminiu, zincul, magneziul, cadmiul etc.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru realizarea operației de sublimare se aplică următoarele procedee generale:

— Sublimarea simplă, cînd vaporii formați din amestecul solid nu mai conțin alte gaze sau vapori în amestec; sublimarea se realizează, de obicei, sub vid.

— Sublimarea cu antrenant; vaporii substanței ce sublimează conțin și alți componenți gazoși și au rolul să accelereze sublimarea ca antrenant. Se folosește: azotul, vaporii de apă, bioxidul de carbon etc.

— Sublimarea fracționată se aplică la separarea amestecului de materiale solide cu volatilități diferite constînd în încălzirea treptată a amestecului solid în timpul sublimării și răcirea treptată a vaporilor formați în timpul desublimării.

2. UTILAJE ȘI INSTALAȚII PENTRU SUBLIMARE

Operația de sublimare se realizează în trei etape, și anume: trecerea solidului în stare de vapori, transportul vaporilor și condensarea lor.

Instalațiile de sublimare simplă (fig. III.41) sînt formate din cel puțin două utilaje principale, vaporizatorul (blaz de sublimare) *1* și condensatorul (desublimator) *2*. În blazul de sublimare are loc vaporizarea substanței solide prin încălzire, iar în desublimator, condensarea vaporilor formați (prin răcire cu apă sau aer).

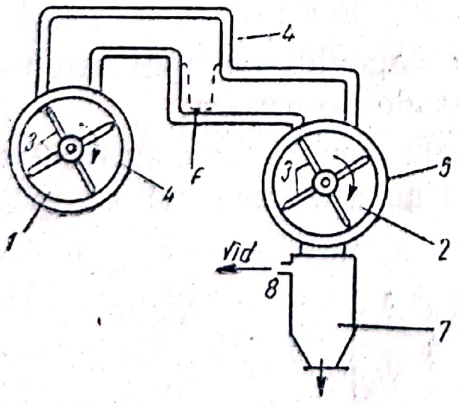

Fig. III.41.Instalație de sublimare simplă:

1 — vaporizator cilindric; *2* — condensator cilindric; *3* — raclete; *4* — manta de încălzire; *5* — manta de răcire; *6* — filtru; *7* — cameră pentru colectarea produsului; *8* — legătura cu pompa de vid.

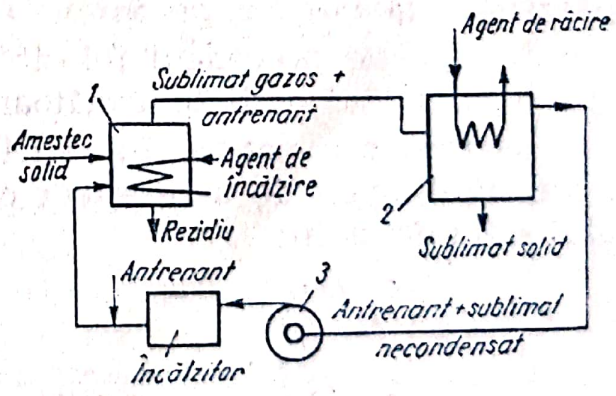

Fig. III.42. Instalație de sublimare cu antrenant:

1 — blaz de sublimare; *2* — cameră de condensare; *3* — ventilator.

Vaporizatorul și condensatorul sînt cilindri orizontali (uneori condensatorul este un cilindru vertical) prevăzuți cu manta de încălzire, respectiv de răcire. În interior sînt dispuse pe un ax în rotație racletele *3*, care curăță suprafața interioară a vaporizatorului și condensatorului. Conductele de legătură între vaporizator și condensator sînt prevăzute cu manta de încălzire *4* și cu un filtru interior *6*, ușor de înlocuit. Sublimatul obținut în condensator este trecut într-o cameră de colectare *7* legată la o pompă de vid, prin racordul *8*.

Instalațiile de sublimare cu antrenant (fig. III.42) sînt formați dintr-o blază de sublimare *1*, unde antrenantul încălzit în prealabil străbate stratul de material solid, care în urma încălzirii sublimează. Vaporii formați, împreună cu antrenantul, trec la desublimare în camera de condensare *2*, în care are loc condensarea vaporilor substanței de separat prin răcire. Antrenantul (împreună cu vaporii necondensați) este recirculat cu ajutorul ventilatorului *3*. Înainte de a intra în blazul de sublimare, antrenantul este încălzit într-un preîncălzitor.

I. USCAREA

1. BAZELE TEORETICE ALE USCĂRII

Uscarea este procesul de îndepărtare a apei sau a altui lichid din materialele lichide sau gazoase.

În funcție de procedeul folosit pentru vaporizarea apei din materialul solid se deosebesc următoarele metode de uscare:

— uscarea convectivă (fig. III.43, *a*), care constă în contactul direct al unui agent de uscare (aer cald sau gaze de ardere) cu materialul solid de uscat;

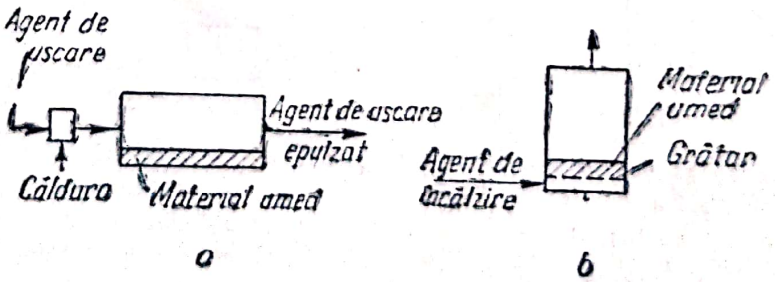

Fig. III.43. Schema de principiu a uscării materialelor solide:
a — convecție; *b* — contact.

— uscarea prin contact (fig. III.43, *b*), care constă în încălzirea materialului solid de uscat prin intermediul unei suprafețe de schimb de căldură despărțitor;

— metode speciale de uscare, cum sînt: uscarea cu raze infraroșii, uscarea cu curenți de înaltă frecvență și uscare prin sublimare.

Uscarea presupune următoarele faze principale: încălzirea materialului solid către suprafața acestuia, vaporizarea umidității pe suprafața materialului de uscat și îndepărtarea vaporilor formați.

Procesul de uscare este un proces complex de transfer de căldură și de masă. Uscarea se caracterizează prin:

— viteza de uscare, care reprezintă cantitatea de umiditate eliminată în unitatea de timp de pe unitatea de suprafață de material solid supus uscării;

— timpul de uscare, care este timpul necesar pentru ca un material solid (uscat cu o anumită viteză de uscare) să ajungă de la o umiditate inițială cunoscută la o umiditate finală mai mică, dată.

2. USCAREA CONVECTIVĂ

Uscarea convectivă se realizează prin trecerea unui curent de agent de uscare gazos, încălzit în prealabil, peste stratul de material solid umed. Ca agent de uscare, mai des folosit este aerul cald.

Uscarea convectivă are loc pînă la stabilirea echilibrului dinamic dintre materialul solid umed și agentul de uscare.

a. Parametrii aerului umed

Aerul umed reprezintă un amestec de aer uscat și vapori de apă. El este caracterizat prin:

— *Umiditatea absolută,* care reprezintă cantitatea de vapori de apă ce conține un kilogram sau un metru cub de aer umed.

— *Umiditatea relativă* (sau starea higroscopică) care reprezintă raportul dintre presiunea parțială a vaporilor de apă în aerul umed la un moment dat p_v și presiunea parțială a vaporilor de apă corespunzătoare saturației la aceeași temperatură p_s:

$$\varphi = \frac{P_v}{P_s}. \qquad \text{(III-27)}$$

Valoarea maximă a umidității relative care corespunde aerului saturat în vapori de apă este egală cu 1.

Scanned with OKEN Scanner

— *Conținutul de umezeală* a aerului se definește cu raportul dintre masa vaporilor de apă din aerul umed și masa aerului uscat aflat în amestec:

$$x = \frac{m_v}{m_{au}}. \qquad \text{(III-28)}$$

— *Gradul de saturație* reprezintă raportul dintre conținutul de umezeală la o anumită temperatură și valoarea lui corespunzătoare aerului saturat cu vapori de apă la aceeași temperatură:

$$\psi = \frac{x}{x_s}. \qquad \text{(III-29)}$$

— *Entalpia* I reprezintă suma entalpiilor aerului uscat h_{au} și a vaporilor de apă h_{va} la aceeași temperatură:

$$I = h_{au} + h_{va}. \qquad \text{(III-30)}$$

Entalpia aerului umed depinde de conținutul de umezeală a aerului și de temperatura lui.

În timpul procesului de uscare convectivă, parametrii aerului umed se modifică astfel:

— umiditatea absolută, umiditatea relativă, conținutul de umezeală și gradul de saturare sînt în creștere, iar temperatura scade;

— entalpia rămîne teoretic constantă, deoarece căldura cedată de aer materialului de uscat este consumată pentru vaporizarea apei și revine în aer sub formă de căldură specifică (latentă) de vaporizare împreună cu vaporii de apă.

b. Bilanțul de materiale al procesului de uscare convectivă

Bilanțul general de materiale pentru procesul de uscare este:

$$G_1 = G_2 + W, \qquad \text{(III-31)}$$

unde:

G_1 este cantitatea de material umed supus uscării, în kg/s;
G_2 — cantitatea de material uscat, în kg/s;
W — umiditatea aerului umed exprimată în fracții masice.

Bilanțul pentru materialul solid absolut uscat, cantitate care nu se modifică în timpul procesului, este:

$$G_1 \cdot (1 - w_1) = G_2 \cdot (1 - w_f). \qquad \text{(III-32)}$$

Pentru calculul consumului de aer se pornește de la relația:

$$L \cdot x_f = L \cdot x_i + W, \qquad \text{(III-33)}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care:

L este cantitatea de aer uscat, în kg/s;

x_i și x_f — conținutul de umiditate al aerului la intrarea și la ieșirea din uscător;

W — cantitatea de apă, în kg/s;

$L \cdot x_i$ — umiditatea care se introduce în uscător cu aerul, în kg/s;

$L \cdot x_f$ — umiditatea care se evacuează cu aerul epuizat, în kg/s,

de unde consumul de aer este:

$$L = \frac{W}{X_f - X_i}, \qquad \text{(III-34)}$$

iar consumul specific de aer (pentru 1 kg de apă evaporată) este:

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_f - x_i}. \qquad \text{(III-35)}$$

c. Procedee de uscare convectivă

În funcție de modul de introducere a căldurii necesare uscării și de temperatura cerută în uscător se deosebesc următoarele scheme de uscare convectivă:

— *Uscare cu încălzirea totală a aerului* (fig. III.44, *a*). În cazul aplicării acestui procedeu, toată căldura necesară în uscător este furnizată de aerul de uscare care se încălzește o singură dată în calorifer pînă la temperatura la care asigură căldura necesară încălzirii materialului solid și vaporizării umidității. Această schemă presupune uscarea la temperaturi relativ ridicate, și, prin urmare, nu poate fi aplicată pentru uscarea materialelor termolabile.

— *Uscare cu încălzire suplimentară a aerului în uscător* (fig. III.44, *b*). Această schemă de uscare permite scăderea temperaturii

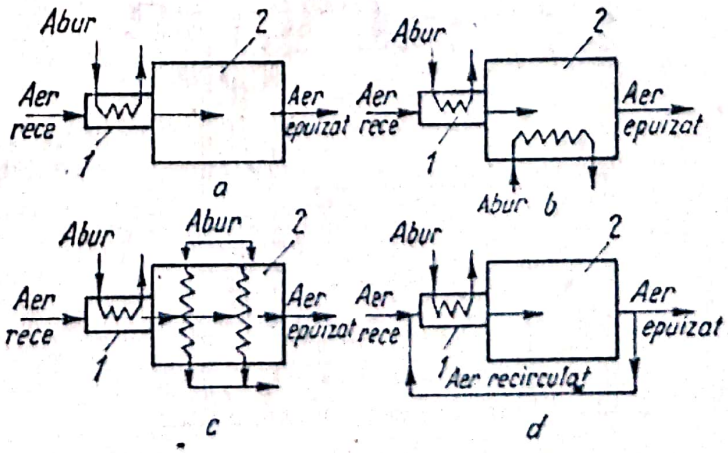

Fig. III.44. Scheme de uscare:
a — cu încălzire totală a aerului; *b* — cu încălzire suplimentară; *c* — cu încălzire intermediară; *d* — cu recirculație parțială a aerului; *1* — calorifer; *2* — uscător.

aerului la ieşirea din preîncălzitor, adică uscarea are loc la o temperatură mai scăzută decît în procedeul anterior.

— *Uscare cu încălzire intermediară a aerului în uscător* (fig. III.44, c). Uscarea după această schemă are loc atît cu reducerea temperaturii aerului cît şi cu o solicitare termică uniformă a materialului de uscat. Variaţiile de temperatură în procesul de uscare sînt mai reduse.

— *Uscare cu recircularea parţială a aerului* (fig. III.44, *d*). Acest procedeu permite utilizarea raţională a căldurii, prin recuperarea ei din aerul umed epuizat.

d. Tipuri de uscătoare convective

Uscătoarele prin construcţia lor urmăresc asigurarea unor condiţii optime pentru desfăşurarea operaţiei de uscare atît din punct de vedere tehnologic cît şi din punct de vedere economic.

Uscătoare cameră. Aceste tipuri de uscătoare sînt încăperi de formă paralelipipedică, de mărimea unui dulap pînă la mărimea unei camere, în care materialul de uscat dispus pe poliţe sau încărcat pe cărucioare, nu se află în stare de mişcare. Aerul de uscare circulă paralel cu suprafaţa materialului solid sau străbate stratul de material.

În figura III.45 este redată schiţa unui uscător cameră cu recircularea parţială a aerului. În cazul acestui uscător, aerul este încălzit o singură dată înainte de a intra în uscător, iar înainte de încălzire se amestecă cu o parte din aerul epuizat care a trecut prin uscător.

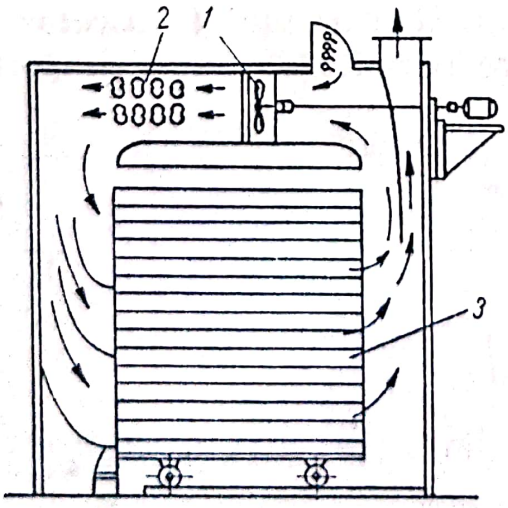

Fig. III.45. Uscător cameră cu recirculare parţială a aerului:
1 — ventilator; *2* — calorifer; *3* — cărucior.

Scanned with OKEN Scanner

Uscătoarele cameră sînt folosite în industria chimică la fabricarea obiectelor din materiale ceramice, la fabricarea coloranților, medicamentelor, pigmenților etc.

Dezavantajul acestor uscătoare constă în discontinuitatea operațiilor de încărcare și descărcare.

Uscătoare cu strat fluidizat. Intensificarea operației de uscare prin aplicarea fluidizării se datorește creșterii vitezei procesului de transfer de căldură și de masă între cele două faze (material solid de uscat și agentul de uscare), care duce la uniformizarea rapidă a temperaturilor. Aceste tipuri de uscătoare sînt folosite în special pentru uscarea materialelor cu granulație mică pentru uscarea materialelor cristaline. Ca agent de uscare se folosesc gazele de ardere sau aerul cald, care sînt agenți de fluidizare.

În figura III.46 este reprezentată schema unei instalații de uscare cu strat fluidizat, cuprinzînd un aparat cu un singur strat fluidizat *2*. Gazele de ardere utilizate ca agent de uscare sînt diluate cu aer rece într-o cameră de amestecare *1* pentru reducerea temperaturii. Pentru uscarea unor materiale care nu sînt sensibile la temperatură (cărbunii) se pot utiliza gazele de ardere ca atare fără a li se reduce temperatura prin amestecare cu aer proaspăt.

Uscătoare prin pulverizare (atomizoare) (fig. III.47). În aceste uscătoare se obține o mărire importantă a suprafeței de contact dintre materialul solid de uscat și agentul de uscare prin pulverizarea

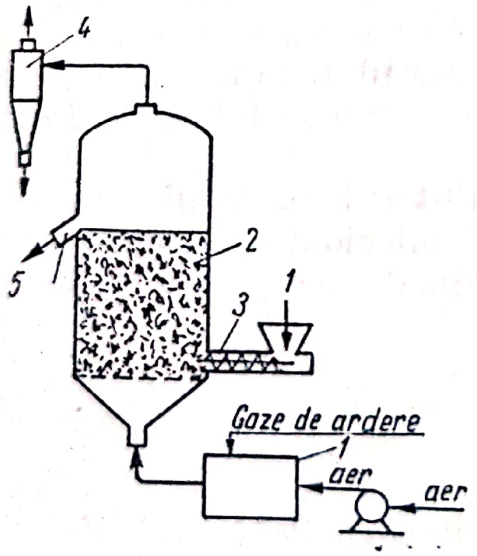

Fig. III.46. Uscător cu strat fluidizat:
1 — cameră de amestec; *2* — uscător cu strat fluidizat; *3* — alimentarea materialului de uscat; *4* — ciclon; *5* — evacuarea materialului de uscat.

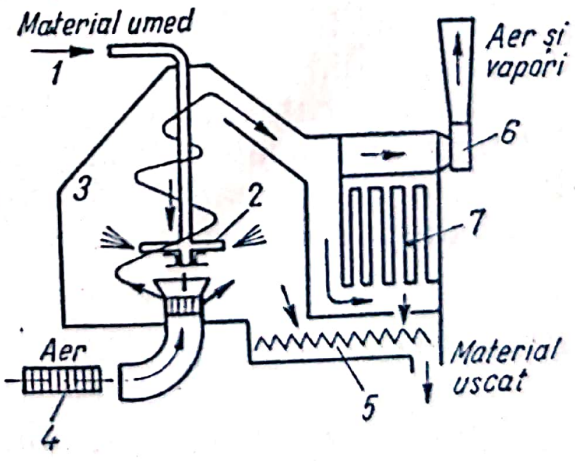

Fig. III.47. Uscător prin pulverizare:
1 — conductă pentru alimentarea cu material umed; *2* — disc de pulverizare; *3* — cameră de uscare; *4* — calorifer; *5* — transportor elicoidal; *6* — ventilator; *7* — filtru cu saci.

Scanned with OKEN Scanner

fină a substanței de uscat, care se află, de obicei, în stare lichidă (soluții, suspensii, topituri etc.). Pulverizarea se realizează cu aparate speciale numite *atomizoare*.

3. USCAREA PRIN CONTACT. TIPURI DE USCĂTOARE PRIN CONTACT

Uscarea prin contact sub vid se realizează la presiune atmosferică sau se folosește de obicei în cazul uscării materialelor sensibile la temperatură.

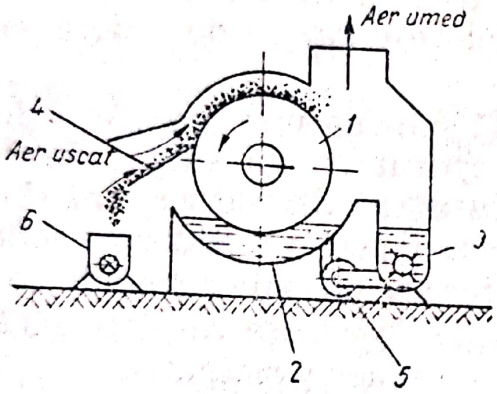

Fig. III.48. Schema de principiu a unui uscător cu un cilindru.

Uscătoare cu cilindri (fig. III.48). Aceste tipuri de uscătoare pot fi cu unul sau cu doi cilindri goi în interior, așezați paralel și care se rotesc în sens contrar. Uscătorul se compune dintr-o carcasă exterioară cu două cuve *2* și *3*. Materialul supus uscării se introduce în cuva *3*, unde este menținut în agitare permanentă. Cuva *2* este alimentată continuu din cuva *3* cu ajutorul pompei centrifuge *5*. Aburul necesar încălzirii și uscării materialului se introduce în interiorul cilindrului.

Materialul uscat este desprins cu ajutorul cuțitului răzuitor *4*, fiind trimis în jgheabul transportorului elicoidal *6*. Eliminarea vaporilor rezultați se realizează prin suflare de aer prin gura de evacuare a materialului uscat.

4. METODE SPECIALE DE USCARE

— *Uscarea cu curenți de înaltă frecvență* (fig. III.49). Folosirea curenților de înaltă frecvență dă posibilitatea de intensificare a procesului de uscare, datorită difuziunii termice și electroosmozei; are însă dezavantajul consumului mare de energie electrică.

— *Uscarea cu radiații infraroșii*. Această metodă de uscare se aplică pentru uscarea unor materiale ca: medicamente, vopsele, ma-

Scanned with OKEN Scanner

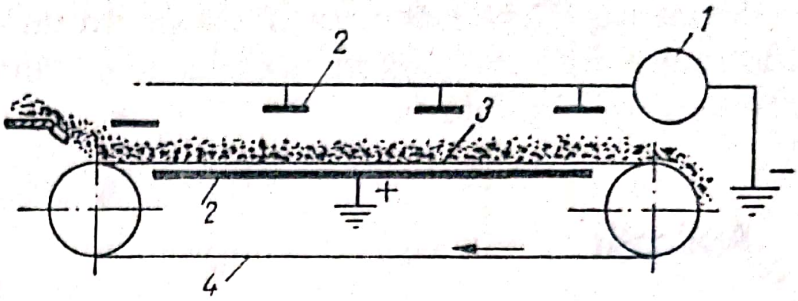

Fig. III.49. Uscător primar cu curenți de înaltă frecvență:
1 — generator de curent de înaltă frecvență; *2* — electrozi; *3* — material de uscat; *4* — bandă transportoare.

teriale plastice, materiale explozive etc. Avantajul acestei metode de uscare constă în aceea că, radiațiile pătrund în masa materialului umed, asigură o uscare uniformă, fără formare de cruste pe suprafața materialului de uscat. Pentru producerea radiațiilor infraroșii sînt folosite lămpi speciale cu filament de wolfram, sau radiatoare metalice ori ceramice încălzite cu gaze sau abur.

În figura III.50 este prezentată schița unui uscător cu radiații obținute cu ajutorul unor arzătoare cu gaz metan *1*. Materialul de uscat circulă prin uscător pe o bandă rulantă din metal *3* cu viteză redusă. Aerul necesar arderii este introdus cu ajutorul ventilatorului *6*.

— *Uscarea prin sublimare.* Umiditatea din materiale solide poate fi îndepărtată prin trecerea directă a apei din faza solidă în faza de vapori. Pentru aceasta este necesară răcirea materialului de uscat la temperaturi joase (—15°C÷—40°C) și creere de vid. În aceste condiții, apa se evaporă rapid din materialul solid de uscat, unde se află în stare de gheață. Frigul necesar pentru înghețarea materialului este obținut de obicei cu ajutorul unei instalații de frig prin comprimare.

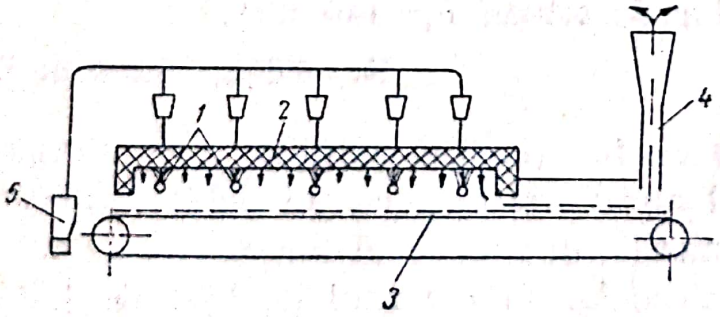

Fig. III.50. Uscător prin radiații:
1 — arzător cu gaz metan; *2* — radiator; *3* — bandă rulantă; *4* — coș de evacuare a fazei de ardere; *5* — ventilator.

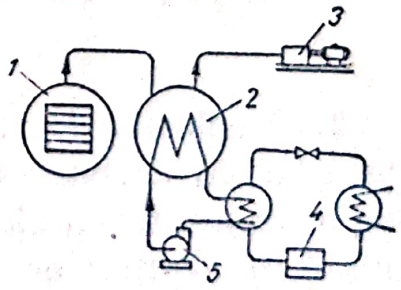

Fig. III.51. Instalație de uscare prin sublimare:
1 — cameră de uscare; *2* — condensator; *3* — pompă de vid.

Scanned with OKEN Scanner

În figura III.51 este prezentată schița unei instalații de uscare prin sublimare folosită pentru uscarea medicamentelor, vitaminelor și a produselor alimentare.

Aplicații

1. Să se calculeze masa moleculară medie a unui amestec de benzen și toluen care conține 30% benzen, cunoscînd că masa moleculară a benzenului $M_B=78$, iar a toluenului $M_T=92$.

R: 87,2.

2. Să se calculeze presiunea parțială a oxigenului din aer cu un conținut de 21% oxigen. Presiunea aerului este egală cu 1 barr.

R: 0,21 barr.

3. Într-o coloană de absorbție se absoarbe în apă amoniac în amestec cu aer. Concentrația NH_3 în aer la intrare în coloană $Y_i=0{,}031$, iar la ieșirea din coloană $Y_f=0{,}0016$ kg NH_3/kg aer; concentrația amoniacului în apă la intrare în coloană $X_i=0{,}002$ kg/NH_3/kg apă. Consumul specific de apă $l=1{,}18$ kg/kg. Se cere să se determine concentrația amoniacului în apă la ieșirea din coloană (X_f).

R: 0,0268.

4. Să se calculeze compoziția fazei de vapori care se găsește în echilibru la temperatura de 60°C, cu un amestec benzen-toluen conținînd 40% mol benzen și 60% mol toluen. Se dau presiunile de vapori la această temperatură: presiunea vaporilor de benzen $P_b=385$ torr, presiunea vaporilor de toluen $P_t=140$ torr.

R: 64,8%; 35,2% mol.

5. O coloană de rectificare cu funcționare continuă este alimentată cu un amestec de alcool metilic și apă, cu un debit $F=5\,000$ kg/h; concentrația alcoolului metilic în amestecul inițial este de 40% masă, în distilat de 98,5% masă, iar în reziduul de blaz de 1,5% masă. Se cere să se determine debitul de distilat și debitul de reziduu de blaz.

R: 0,552 kg/s; 0,838 kg/s.

Scanned with OKEN Scanner

6. Să se determine concentrația sulfatului de magneziu în soluția mamă după cristalizarea la 50°C. Se dă: debitul de soluție inițială S_i=5 000 kg/h, concentrația inițială a sulfatului de magneziu C_i=27% masă, debitul soluției mamă S_m=4 015 kg/h și cantitatea de cristale obținute K=726 kg/h, masa moleculară a sulfatului de magneziu M_{MgSO_4}=120.

R: 25%.

7. Să se calculeze cantitatea de apă evaporată într-o oră, dintr-un material solid supus uscării cu un debit G_1=1 235 kg/h. Se dă umiditatea inițială w_i=77,5% și umiditatea finală w_f=5%.

R: 942 kg/h.

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL IV

REACTOARE CHIMICE

Reactoarele sînt utilajele în care se realizează reacţiile chimice. Ele sînt punctele cheie ale instalaţiilor din industria chimică, de funcţionarea lor depinzînd în mare măsură realizarea indicatorilor de calitate, productivitate, consum şi cost de producţie.

Indiferent de forma constructivă şi de condiţiile de funcţionare, reactoarele chimice îndeplinesc următoarele funcţii:

— Alimentarea cu materii prime şi auxiliare a spaţiului de reacţie şi evacuarea produselor de reacţie din acest spaţiu.

— Asigurarea volumului de reacţie necesar şi a capacităţii de producţie.

— Realizarea condiţiilor de temperatură, presiune, timp şi punere în contact a reactanţilor conform prevederilor procesului tehnologic.

— Realizarea circulaţiei fluxului de materiale în spaţiul de reacţie.

Pentru îndeplinirea acestor funcţii, în reactoarele chimice pe lîngă procesul chimic de bază au loc o serie de procese fizice ca: amestecarea, transferul de căldură, transferul de masă etc.

1. CLASIFICAREA REACTOARELOR CHIMICE

Reactoarele se clasifică după mai multe criterii:

— *După modul de funcţionare,* reactoarele pot fi cu funcţionare continuă, semicontinuă şi periodică.

— *După regimul de circulaţie al reactanţilor* reactoarele pot fi cu deplasare totală şi cu agitare perfectă.

— *După forma constructivă* sînt tip cameră de reacţie (autoclavă), tip schimbător de căldură, tip coloană de reacţie, tip cuptor (sobă de reacţie).

Scanned with OKEN Scanner

— *După starea de agregare a reactanţilor,* reactoarele pot fi: pentru reacţii omogene în fază gazoasă, reacţii omogene în fază lichidă, reacţii eterogene lichid-lichid, reacţii eterogene gaz-lichid reacţii eterogene lichid-solid, reacţii eterogene gaz-solid.

2. TIPURI DE REACTOARE

Reactoare cu funcţionare periodică. Reactoarele cu funcţionare periodică şi semicontinuă sînt folosite de obicei pentru obţinerea produselor chimice de mic tonaj ca: reactivi chimici, medicamente, coloranţi etc.

Specific reactoarelor cu funcţionare semicontinuă este faptul că una din materiile prime se alimentează continuu. Evacuarea produselor de reacţie se poate face periodic sau continuu.

În figura IV.1 este reprezentat un reactor cu funcţionare periodică. Reacţia are loc în vasul de reacţie *1*, prevăzut cu un agitator *3*, care asigură amestecarea reactanţilor. Pentru introducerea sau evacuarea căldurii, reactorul este prevăzut cu serpentină interioară *6* sau cu o manta *4*. Reactorul se alimentează prin ştuţul *2*, iar produsul obţinut se evacuează prin ştuţul de golire 5.

Reactoare cu funcţionare continuă cu agitare perfectă (fig. IV.2). Pentru producţia de mare tonaj sînt utilizate reactoarele cu funcţionare continuă. În aceste reactoare toate fazele procesului de transformare chimică a substanţelor (alimentarea reactanţilor, reacţia chimică, descărcarea produselor) au loc în acelaşi timp. Aceste

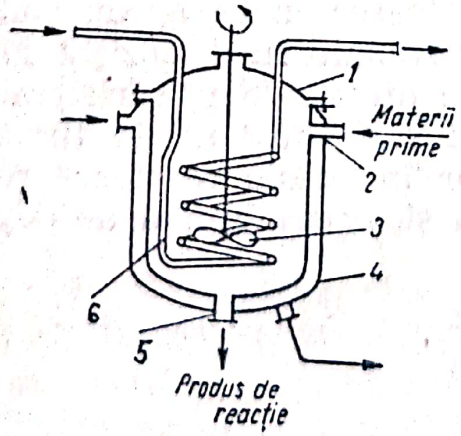

Fig. IV.1. Reactor cu funcţionare discontinuă:
1 — reactor; *2* — ştuţ de alimentare; *3* — agitator; *4* — cămaşă; *5* — ştuţ de golire; *6* — schimbător de căldură tip serpentină.

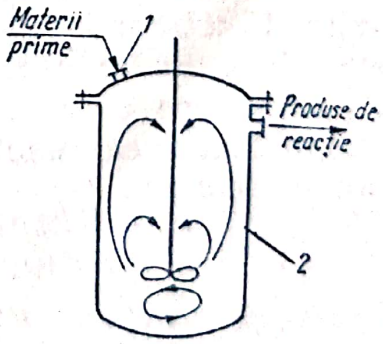

Fig. IV.2. Reactor cu funcţionare continuă.
1 — ştuţ de alimentare; *2* — reactor.

Scanned with OKEN Scanner

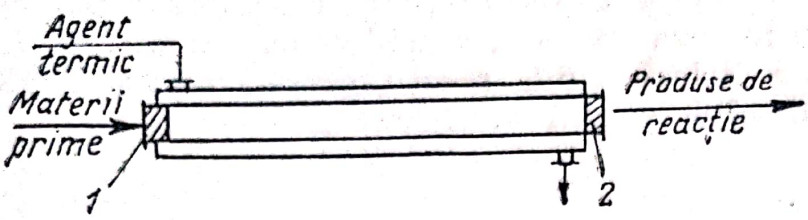

Fig. IV.3. Reactor cu deplasarea totală:
1, 2 — elemente de flux.

reactoare se utilizează pentru realizarea reacțiilor în mediu lichid. Din această categorie fac parte majoritatea reactoarelor tip autoclavă, prevăzute cu agitare mecanică sau cu agitare prin barbotare. Ele se compun dintr-un vas cilindric *1*, prevăzut cu un agitator mecanic *2* și cu un ștuț de alimentare și evacuare a reactanților *3* și *4*. În cazul acestor reactoare, parametrii funcționali sînt aceiași în tot spațiul de reacție. O caracteristică importantă a acestor reactoare este timpul de ședere a reactanților în reactor (T_r). Acest indicator determină timpul de contact între reactanți, randamentul de transformare al materiilor prime în produse de reacție și în final, productivitatea reactorului.

$$T_r = \frac{V}{Q_v}, \qquad \text{(IV-1)}$$

unde:

T_r este timpul de ședere al reactanților în reactor, în s;
V — volumul reactorului, în m^3;
Q_v — debitul volumic al reactanților, în m^3/s.

Reactoare cu deplasarea totală a reactanților (fig. IV.3). Aceste reactoare se caracterizează prin valoarea mare a raportului între lungime și diametru. Ele nu sînt prevăzute cu dispozitiv de agitare.

Parametrii funcționali variază pe direcția deplasării reactanților, dar în același punct al reactorului sînt constanți în timp.

Timpul de ședere al reactanților în aceste reactoare reprezintă raportul între lungimea reactorului și viteza liniară de deplasare a reactanților în reactor:

$$T_r = \frac{L}{W}, \qquad \text{(IV-2)}$$

unde:

T_r este timpul de ședere a reactanților în reactor, în s;
L — lungimea reactorului, în m;
W — viteza liniară de deplasare a reactanților în reactor, în m/s.

Scanned with OKEN Scanner

Aceste tipuri de reactoare sînt folosite pentru realizarea reacţiilor în care cel puţin una dintre faze este gazoasă sau lichidă. Cel mai mult sînt folosite pentru reacţii omogene în fază gazoasă.

Reactoare pentru reacţii omogene în fază gazoasă. În reacţiile omogene în fază gazoasă, toţi reactanţii care iau parte la procesul transformării chimice constituie o singură fază. Asemenea reacţii au loc la fabricarea acidului clorhidric gazos, oxidului de azot în arc electric, etenei din etan, la clorurarea termică a metanului, la oxidarea parţială a metanului etc.

Specific pentru aceste reactoare este faptul că reacţia are loc în flacără la temperaturi ridicate.

În figura IV.4 este prezentat reactorul (sobă de sinteză) pentru sinteza acidului clorhidric gazos. El este format dintr-un corp metalic *1*, compus din două trunchiuri de con avînd baza mare comună. Trunchiul de con superior este de două ori mai înalt decît cel inferior, avînd un capac *2*, din tablă subţire protejată în interior cu azbest (membrană de explozie).

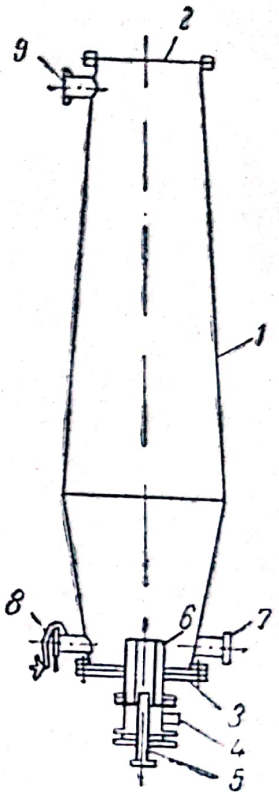

Fig. IV.4. Sobă pentru sinteza acidului clorhidric:
1 — sobă; *2*, *3* — capace; *4*, *5* — racorduri pentru intrarea hidrogenului respectiv a clorului; *6* — racord; *7* — gură de control; *8* — orificiu; *9* — racord pentru reacţii medii viscoase

La partea inferioară a sobei se află arzătorul fixat în capacul de fund *3*. Arzătorul este legat de sursa de hidrogen prin racordul *4* şi cu cea de clor prin racordul *6*. În interior, spaţiul de lucru a reactorului este gol. În vederea pornirii se dă drumul curentului de hidrogen, care se aprinde. Amorsarea fiind făcută se dă drumul treptat şi curentului de clor. În urma arderii hidrogenului în clor rezultă acidul clorhidric gazos după reacţia:

$$H_2 + Cl_2 = 2\,HCl$$

Din ardere rezultă căldură, care este eliminată din spaţiul de lucru al sobei prin răcirea pereţilor cu aer atmosferic.

Reactoare pentru reacţii omogene în faza lichidă. Reactoarele pentru reacţiile omogene în fază lichidă, în majoritatea cazurilor, sînt de tip cameră de reacţie (autoclavă cu agitator de diferite tipuri) prevăzută cu dispozitive de încălzire sau răcire. Construcţia agitatorului depinde de viscozitatea mediului. Pentru medii viscoase se folosesc, de obicei, agitatoare tip ancoră (fig. IV.5).

Scanned with OKEN Scanner

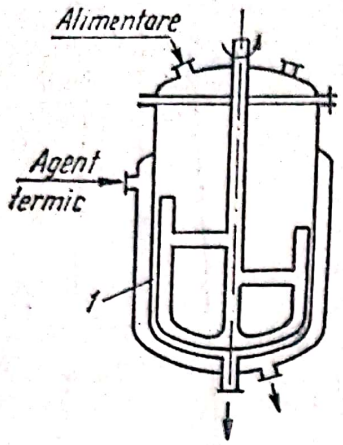

Fig. IV.5. Reactor pentru reacții medii vîscoase:
1 — amestecător tip ancoră.

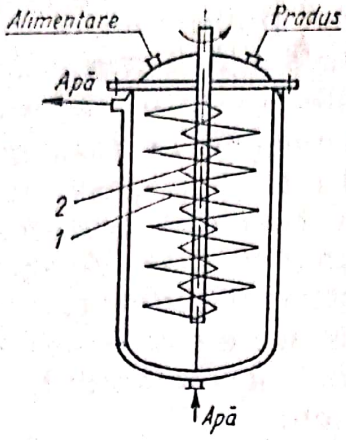

Fig. IV.6. Reactor pentru polimerizarea butadienei:
1, 2 — spirale ale amestecătorului.

Pentru reacția exotermă de polimerizare a butadienei, cînd viscozitatea mediului se modifică substanțial în timpul procesului, se folosesc reactoare de tipul celei prezentat în figura IV.6. Deoarece reacția are loc la temperatură constantă (+15°C), reactorul este prevăzut cu o manta de răcire și cu un agitator format din două spirale *1* și *2*, de diametre diferite, care asigură o amestecare foarte bună a întregii mase de reacție.

Pentru reacții omogene în fază lichidă sînt folosite și reactoare cu deplasare totală.

Reactoare pentru reacții eterogene lichid-lichid. Reacțiile eterogene lichid-lichid au loc între două sau mai multe lichide nemiscibile sau parțial miscibile. Reacția se petrece la interfața dintre lichide, iar produsul rezultat este solubil într-unul din ele. Reacțiile de sulfonare și nitrare a substanțelor organice, polimerizare în emulsie, esterificare sînt exemple tipice de reacții eterogene lichid-lichid.

Cea mai mare parte a reactoarelor pentru reacții eterogene lichid-lichid sînt de tip autoclavă, cu agitator și dispozitive de răcire sau încălzire, asemănătoare cu reactoarele pentru reacții omogene în faza lichidă (v. fig. IV.1 și IV.5). Ele pot fi cu funcționare discontinuă, semicontinuă sau continuă.

Pentru mărirea timpului de contact între reactanți, ele sînt montate mai multe în cascadă. Numărul reactoarelor în cascadă ajunge pînă la 15—20.

Reactoare pentru reacții eterogene gaz-lichid. Reacțiile eterogene gaz-lichid se numesc chemosorbții, deoarece procesul de absorbție fizică este urmat de o reacție chimică între faza gazoasă și faza lichidă.

Reactoarele folosite pentru reacții eterogene gaz-lichid au construcție asemănătoare cu coloanele de absorbție, au volum mare și sînt ușor de exploatat. Cel mai des sînt folosite coloanele cu umplutură sau coloanele cu talere (v. cap. absorbție). Asemenea reactoare

Scanned with OKEN Scanner

sînt folosite la fabricarea acidului azotic diluat (coloană de chemosorbţie a oxizilor de azot), a acidului sulfuric (chemosorbţia trioxidului de sulf în apă), la oxidarea acetaldehidei etc.

Pentru reacţiile eterogene gaz-lichid se mai folosesc reactoarele cu amestecare perfectă prin barbotare.

În figura IV.7 este reprezentat un reactor folosit la fabricarea dicloretanului din etan şi clor. Reacţia dintre etan şi clor are loc în masa dicloretanului lichid aflat în reactor. Clorul şi etanul sînt introduşi în reactor prin două conducte separate, barbotîndu-se în masa dicloretanului lichid. Temperatura în reactor se menţine constantă la +40°C cu ajutorul apei de +10°C din mantaua de răcire a reactorului.

Reactoare pentru reacţii eterogene lichid-solid. Reacţiile eterogene lichid-solid se pot realiza prin trecerea lichidului peste unul sau mai multe straturi solide (demineralizarea apei cu schimbători de ioni) sau prin amestecarea lichidului cu faza solidă cu ajutorul unui agitator mecanic (fabricarea superfosfatului, obţinerea acetilenei din carbid etc.).

În figura IV.8 este reprezentat reactorul turn pentru fabricarea superfosfatului. Apatita măcinată este introdusă în reactor prin pîlnia de alimentare *1*, iar acidul sulfuric este dozat prin traseul *5*. Gazele degajate sînt aspirate de suflanta *3*. Produsul finit este evacuat din aparat cu ajutorul extractorului *4*.

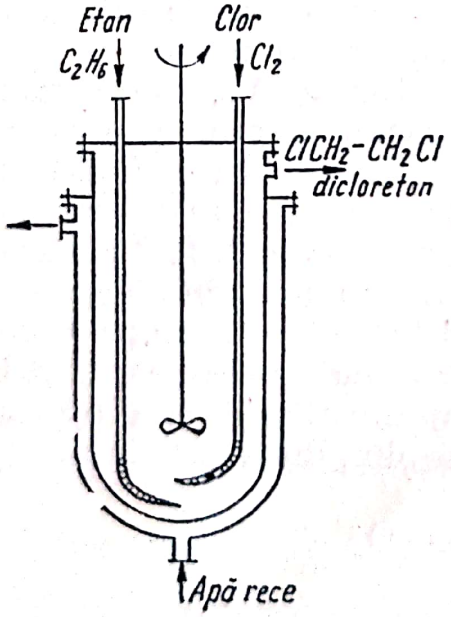

Fig. IV.7. Reactor pentru obţinerea dicloretanului.

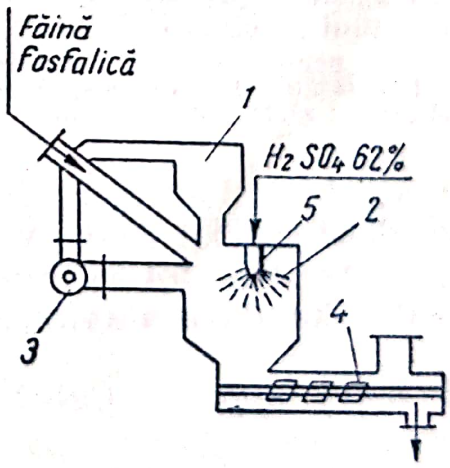

Fig. IV.8. Reactorul turn pentru fabricarea superfosfatului:

1 — pîlnie de alimentare; *2* — reactor; *3* — suflantă; *4* — extractor; *5* — racordul de intrare a acidului sulfuric.

Scanned with OKEN Scanner

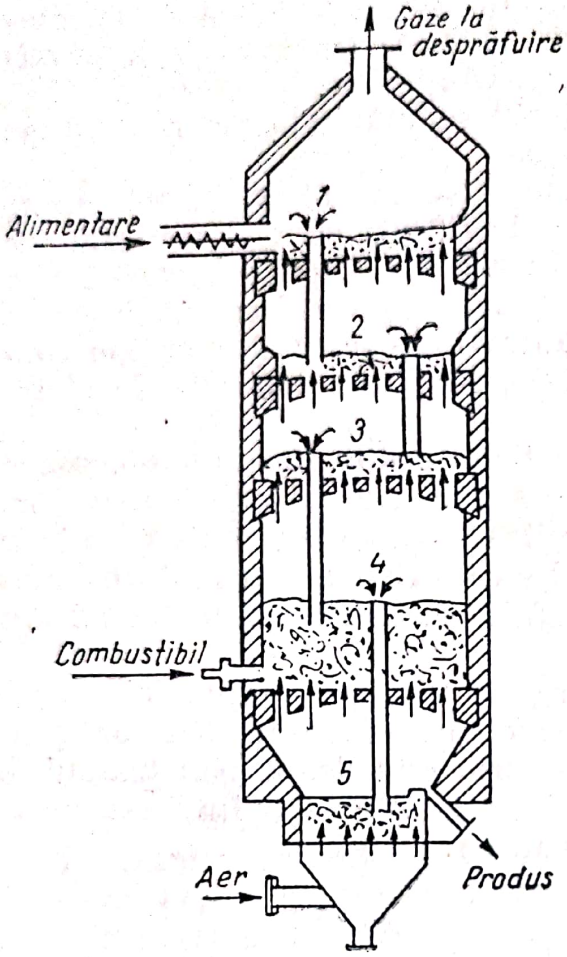

Fig. IV.9. Aparat etajat pentru arderea calcarului în strat fluidizat:
1, 2, 3 — stratul pentru preîncălzirea materialului; *4* — stratul de calcinare; *5* — stratul pentru răcirea produsului.

Reactoare pentru reacţii eterogene gaz-solid. Reacţiile eterogene gaz-solid se împart în două categorii:

— reacţii eterogene gaz-solid necatalitice;

— reacţii eterogene gaz-solid catalitice.

Reacţiile eterogene gaz-solid necatalitice se produc prin adsorbţie, urmată de reacţia chimică, între gaz şi materialul solid, adică prin chemosorbţie. Aceste reacţii sînt specifice, în general, industriei chimice anorganice.

Deoarece reacţiile eterogene gaz-solid necatalitice au loc la temperaturi ridicate, reactoarele folosite pentru aceste reacţii se mai numesc şi *cuptoare*. Ele pot fi verticale (cuptoare pentru prăjirea piritei, cuptoare de ardere a varului etc.), rotative (cuptoare de ciment, cuptoare de calcinare etc.) sau cu strat fluidizat.

În figura IV.9 este reprezentat un reactor (cuptor) pentru arderea calcarului în strat fluidizat. În cuptor există patru straturi fluidizate, etajate, 1, 2, 3 şi 4, dispuse deasupra unor grătare speciale, rezistente, atît la acţiuni mecanice, cît şi la acţiuni termice. Granulele fine de calcar străbat cele patru straturi de sus în jos, prin tuburi deversoare. În stratul 4 se introduce combustibilul, care prin ardere produce descompunerea termică a calcarului, după reacţia:

$$CaCO_3 = CaO + CO_2$$

Aerul necesar combustiei se introduce la partea inferioară a cuptorului prin orificiul unui grătar de distribuire uniformă, în stratul 5 de oxid de calciu format, pe care îl răceşte.

Reacţiile eterogene gaz-solid catalitice sînt cele care se petrec între reactanţi gazoşi pe suprafaţa catalizatorilor solizi. Asemenea

Scanned with OKEN Scanner

reacţii au o răspîndire deosebit de mare în industria chimică organică şi în petrochimie.

În funcţie de modul de aşezare al catalizatorului, reactoarele pentru reacţiile eterogene gaz-solid catalitice pot fi cu strat fix de catalizator, tip schimbător de căldură multitubular, cu catalizator sub formă de site metalice şi cu catalizator în strat fluidizat.

Reactoarele cu strat fix de catalizator (fig. IV.10, *a*) sînt folosite pentru conversia catalitică a bioxidului de sulf la trioxid de sulf, pentru sinteza amoniacului etc.

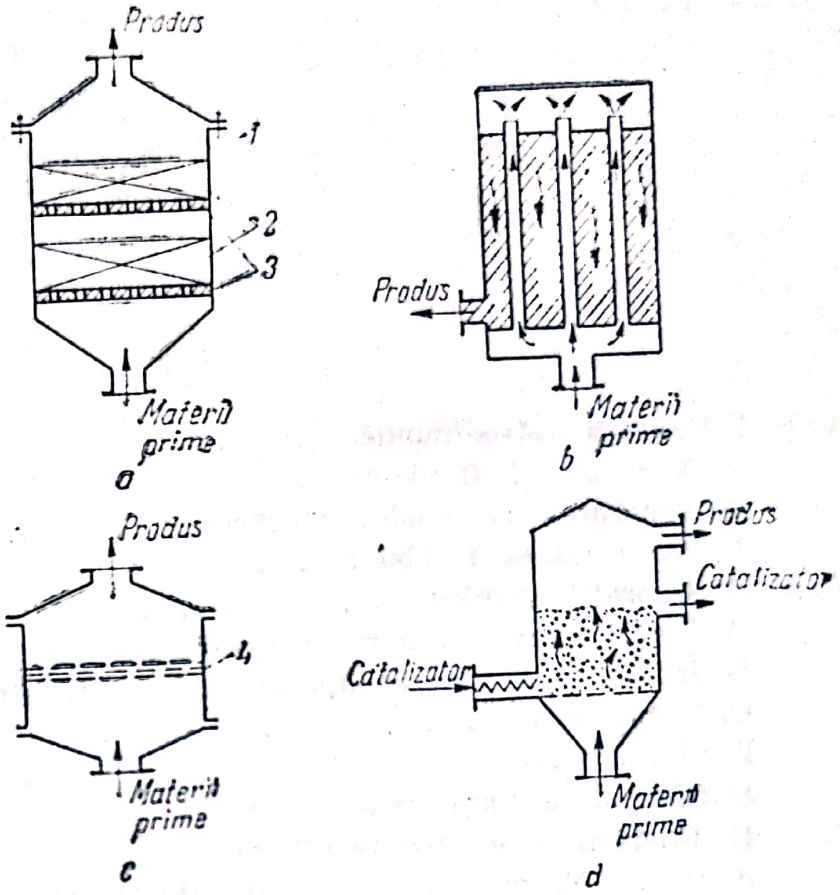

Fig. IV.10. Reactoare pentru reacţii catalitice: *a* — reactor cu catalizator în strat fix; *b* — reactor tip schimbător de căldură multitubular; *c* — reactor cu catalizator sub formă de site metalice; *d* — reactor cu catalizator în strat fluidizat; *1* — reactor; *2* — catalizator; *3* — grătare perforate; *4* — site.

Reactoarele tip schimbător de căldură multitubular (fig. IV.10 *b*) sînt folosite atît în industria chimică anorganică cît şi în industria chimică organică şi petrochimică.

Reactoarele cu catalizator sub formă de site (fig. IV.10, *c*) sînt folosite pentru reacţiile care au loc cu viteze mari, ca de exemplu oxidarea amoniacului, fabricarea acidului azotic, a formaldehidei etc.

Reactoarele cu catalizator în strat fluidizat (fig. IV.10, *d*) asigură o suprafaţă mare de contact, ceea ce uşurează reglarea regimului de temperatură în reactor. Stratul fluidizat dă posibilitatea de recirculare a catalizatorului, asigurînd regenerarea continuă a lui.

Reactoarele pentru reacţiile eterogene gaz-solid catalitice se numesc şi *sobe de contact*.

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINS

Cap. I. **Operații hidrodinamice** 3
A. Transportul fluidelor 3
B. Separarea sistemelor eterogene 23
C. Amestecarea fluidelor 38
Cap. II. **Operații termice** 44
A. Transmiterea căldurii (Transferul de căldură) 44
B. Încălzirea și răcirea aparatelor din industria chimică 50
C. Evaporarea 61
D. Condensarea 67
E. Răcirea la temperaturi joase 69
Cap. III. **Operații și procese de difuziune** 73
A. Bazele teoretice ale procesului de transfer de masă 73
B. Absorbția 77
C. Distilarea și rectificarea 85
D. Extracția 95
E. Fluidizarea 102
F. Adsorbția 105
G. Cristalizarea 109
H. Sublimarea 112
I. Uscarea 114
Cap. IV. **Reactoare chimice** 124

Coli de tipar: 8,25. Format: 16/61×86. Bun de tipar: 27. V. 1980. Nr. plan: 15309. Ediția: 1980.

Tiparul executat sub comanda nr. 152, la Întreprinderea Poligrafică „Crișana", Oradea, str. Moscovei nr. 5.
Republica Socialistă România

Scanned with OKEN Scanner